

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

LES NANOTECHNOLOGIES OU L'IMPENSÉ DE L'ÉPISTEMOLOGIE :  
D'UNE SCIENCE QUI REPRÉSENTE À UNE SCIENCE QUI INTERVIENT

THÈSE EN COTUTELLE  
PRÉSENTÉE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DU DOCTORAT EN PHILOSOPHIE

PAR

THIERNO GUÈYE

OCTOBRE 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»



## AVANT-PROPOS

Bépp làkk rafet na  
Buy tudd ci jaam ngor la  
Buy leeral ci nit xel ma  
SERIÑ MUUSAA KA

Est belle toute langue  
Qui à l'esclave rappelle sa noblesse  
Et qui, en l'humain, éveille la sagesse  
SERIGNE MOUSSA KÂ (1883-1967)

Tout d'abord, j'aimerais dédier ce travail à mon petit frère El Hadj Abdoulaye Guèye que nous appelions affectueusement Abdou et qui a été arraché trop tôt à notre affection le 7 octobre 2013, mais pour qui je formule mes meilleures prières. Tu fus plus qu'un frère pour moi, plus qu'un ami, plus qu'un confident. Tes qualités et ta piété ont fait de toi le plus noble d'entre nous, puisses-tu reposer en paix auprès de notre guide et protecteur, Serigne Abdou Hakim Mbacké qui t'a précédé de seulement 3 mois. Si cette thèse avait été un petit garçon, il porterait assurément ton nom. Je ne te remercierai jamais assez d'avoir été notre *alter ego* auprès des miens alors que je n'ai pas le don d'ubiquité. Dommage pour nos projets... Merci Serigne Bassirou Mbacké pour votre soutien, votre présence et vos prières, je sais qu'avec vous et grâce à vous, je n'aurai plus de raison de me sentir seul. Je remercie aussi Serigne Cheikh Mbacké Abdou Hakim pour sa disponibilité, sa flexibilité ainsi que ses prières, tout comme Serigne Abdou Aziz Mbacké *Majalis* pour ses encouragements, mais aussi Gorgui Diouf pour Feyerabend et Babacar Diongue pour Kuhn.

Merci aussi à l'ensemble de ma famille, mon père Moumar, ma mère Fatoumata Sène dite Ndèye Fall, ma tante Aïssatou Kébé, mes frères et sœurs Awa, Mamy, Pape Amadou, El Hadj, Astou, Moustapha Bachir, Yaye Fabinta et les petits derniers de même que leurs mamans, ainsi que tous ceux qui ont joué ce rôle de père ou de mère pour moi. J'aimerais nommer mon papa Gougna Faye et son épouse Diary Diallo, sa belle-sœur Codou Gueye ainsi que tous leurs enfants, Mamadou

Falilou, Lamine, Saliou, Ndiaya, Ndèye Ndioba, Mame Fatou, Adjï Magatte, Mamadou, Douma, Coumba, Adja, Ousseynou, Assane, qui m'ont accueilli, aimé et protégé comme ils l'ont fait pour leur propre fils Pape Khaly Faye, mon ami et frère. Je vous serai à jamais redevable. Cela en étonnera sûrement plus d'un d'avoir autant de pères et de mères, mais je ne saurais taire les soutiens et les apports de ceux et celles qui ont eu une véritable présence parentale, mon père Abe Diop, son épouse et ses enfants ; mon père Mamoussé Diagne et particulièrement son épouse ma maman André-Marie Diagne-Bonané et leurs enfants, mon petit frère Moustapha, ma grande sœur Ndèye Ndiaté, mes petites sœurs Fatou et Ramatoulaye ainsi que Amadou Dièye et Khady Diop ; papa Samba Bèye, son épouse tata Aïda Amar, de même que leurs enfants, Pape, David, Ndèye Bouya, ainsi que Pape Seydou. Je ne m'autoriserai pas d'oublier mon père Amadou Dièye, son épouse Ami Senghor et leurs enfants Moussa, Moumar, Djiby, Maïmouna, Ndèye Fatou, Kolé, Doudou, Adam et Miss, tonton Bassirou Mbodji qui m'a accueilli et accompagné en France avec Mbarick Seck ainsi que son épouse Thiara Mbodji, feu mon grand-père Serigne Mor Mbodj et toute sa famille, Tonton Djiby Koné, tata Oumy Ndiaye, tonton Lamine Fall, tonton Pape Thierno Niang, ma cousine Ndèye Penda Fall pour tout ce qu'elle a fait pour moi pendant mes années de galère estudiantines. Cette liste ne saurait être exhaustive, mais tonton Alfred Coly a eu une vraie présence paternelle à mes côtés et a cru en moi à un moment où j'en avais vraiment besoin, son soutien a beaucoup compté de même que celui de tonton Cheikh Fall et tata Oulèye Niang. À travers toutes ces personnes que je n'ai pu m'empêcher de citer nommément, il y en a des dizaines d'autres que l'espace alloué à cet exercice ne permettra pas de nommer, mais j'espère qu'elles se reconnaîtront dans ce grand Merci que je leur adresse à chacune personnellement, puisque je n'ai rien oublié de ce qu'elles ont fait avec moi et de ce qu'elles ont fait pour moi.

Je ne saurais terminer ce témoignage de ma gratitude éternelle sans adresser à ma Mame Diarra Olivia Bonfils Guèye, celle qui a été avec moi avant même que je ne m'engage dans cette aventure académique, qui m'a aimé inconditionnellement, m'a fait confiance sans hésiter et qui n'a cessé de m'encourager et de me soutenir depuis

la première minute de cette aventure et qui n'a ménagé aucun effort pour qu'elle soit un véritable succès. Mame Diarra, merci d'avoir été là et merci d'avoir assumé mes responsabilités quand je n'étais plus en mesure de le faire et de t'être occupé du petit Moumar afin de me permettre aujourd'hui de présenter le fruit de nos sacrifices communs. Je vous aime tous les deux et j'espère qu'ensemble nous aimerons aussi profondément le reste de la fratrie. Je remercie aussi, du fond du cœur, l'ensemble de sa famille, les Gataletta, les Baudet, feu Papy Robert Baudet pour son respect et sa générosité, ma belle-mère Catherine Baudet et ses ami-e-s Jean-Charlemagne Delaporte, mon premier lecteur et Pierrette, son épouse ainsi que leur amie Fernande Leblanc Sénéchal pour son accueil chaleureux au Québec, mon beau-père Joël Bonfils et ma belle-sœur Lauranne, pour l'amour, les livres offerts, les abonnements au *Monde Diplomatique*, les coupures de journaux et tout le reste.

D'autre part, mes remerciements s'adressent à l'ensemble des enseignants du département de philosophie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (U.CAD) de 1993 à 2001 qui m'ont initié à la philosophie, la logique, l'histoire et la philosophie des sciences. En particulier, aux professeur-e-s Souleymane Bachir Diagne pour toutes sortes de raisons, à Abdoulaye Élimane Kane, à mon grand Bado Ndoeye, à Massaër Diallo, à Aminata Diaw Cissé, à Malick Ndiaye pour les cours de sociologie, à Ousseynou Kane, à Charles Bowao pour la logique à Boubacar Ly pour l'anthropologie, à Mamadou Mbodj pour la psychologie, à Serigne Mor Mbaye pour les cours de psychanalyse ainsi qu'à feu Pape Amadou Ndiaye pour nous avoir initiés à l'histoire des sciences et notre regretté Sémou Pathé Gueye, philosophe militant, sans omettre tout le personnel et mes anciens collègues du département de philosophie dont certains, que je ne pourrai malheureusement pas tous citer ici, sont devenus des ami-e-s cher-e-s, Khadim Ndiaye, Habib Ampa *Diogène* Dieng, Moctar Ba, Babacar Fall, Issa Sow, Boubacar Dabo qui m'a déniché la thèse de Sacha Loeve que je remercie d'avoir eu la générosité de partager avec nous, Bira Sall, Alassane Soumaré, Ndèye Louise Sarr, Marianne Diaz, Marie-Louise Bassène, Adélaïde Dibor Tine, Oumou Touré, Ndèye Fatou Sané, Khadidiatou Fall, Thiendella Fall, Malick Gaye, Amadou Sow, Papa Ngor Ngom, Élimane Thiam,

Khady Sambe, Arame Niang, Moda Dieng pour sa générosité et sa patience, El Hadj Habib Sy Diop pour, entre autres, sa relecture de l'*abstract*, etc.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes ami-e-s Abdou Fall *sama seriñ*, Cynthia Régy et leurs familles respectives ainsi que leurs deux charmantes filles Amaelle et Kenza, à El Hadj Omar Ndiaye mon hôte à Grenoble et Pape Goumalo Dione, son épouse Marie-Claude Fiset ainsi que leurs familles pour leur amitié, leur accueil et leur hospitalité. Je remercie particulièrement Serigne Mandiaye Diongue de même que son épouse et tous mes condisciples pour tout ce qu'ils apportent à la communauté sénégalaise de Grenoble ainsi que mon *mossido* Mamadou Bachir Bah pour le temps qu'il a consacré à la lecture de mon projet ainsi que ses commentaires, Monaam Kraiem l'ami et le patron engagé, Saïd Hasnaoui, mes amis camerounais Félix Babmseck-Bamseck, bénino-centrafricain Constant Say et Mouhamadou El Hady Ba, le philosophe cognitiviste de la rue d'Ulm, pour leur confiance et leurs encouragements incessants, mon ami d'origine tunisienne, Mourad Trabelsi, mais aussi mes proches de Montréal, Alioune Ndiaye, Baba Kane, Saer Cissé, Cherif Aïssat, Youssou Seck, Assane Touré, El Moctar Diop, Adama Sarr, mes sœurs Astou Seck *Nginaar*, Aminata Coundoul, Catarina Sar, mes frères Assane Touré, Mamadou Diop, Maguette Seck, Mor Diop, Mayacine Thiam, Serigne Thioune, Lô Boye, les deux Bababacar Ba, Akane Ndoeye, Bassirou Samb, Mame Moussa Sy, Sény Dieng, Pape Lô Sy, Amara Seydi, Bakary *Bak's* Sylla qui n'a cessé de m'encourager, Amadou Manel Fall, Mamadou Bamba Tall, doyen Bara Mbengue, mon ami et voisin à Touba Saint-Amable Cheikh Sène, mon cousin Ababacar Diop, Karin Lacroix, mon compatriote Daouda Bouchet, ma sœur Nafissatou Gueye ainsi que leurs familles respectives pour leurs encouragements et leur prompt soutien dans les moments de platitude comme dans les épreuves. À travers eux, je remercie toutes les communautés sénégalaises de Grenoble à Montréal, les associations d'étudiants et le Rassemblement Général des Sénégalais du Canada (RGSC), les *Daahira* Mourides de Grenoble à Montréal, ainsi que mes anciens collègues du Conseil Consultatif des Résidents Étrangers Grenoblois (CREG) de la Mairie de Grenoble, Jaime Alberto Perez, Mohamed Sakali, Linda El Haddad, Daniel Diouf,



Amadou Dia, Cristina Garay, Gilles Kuntz, Ghislain Bouesse et Maïmouna Ndong Étroit. J'ai aussi une pensée pour mes collègues et ami-e-s du Master Géopolitique et Relations internationales (GRI) 2004-2005, de l'Institut des Études Politiques de Toulouse<sup>1</sup>, en particulier Wicem Benelghali, Jevin Pillay, Omar Guenaneche, Anne-Christine Roussel ainsi que l'infatigable professeure Danielle Cabanis, Directrice des études, pour sa disponibilité et son soutien.

*Last but not least*, même si j'ai toujours eu l'intention de faire une thèse de philosophie qui était censée initialement porter sur l'étude de la théorie des paradigmes de Thomas Kuhn que j'avais initiée avec le Pr. Souleymane Bachir Diagne puis Abdoulaye Élimane Kane, c'est ma rencontre avec Denis Vernant qui a déterminé la tournure nano qu'elle a prise. Alors que je cherchais à confronter la théorie de Kuhn à une pratique scientifique particulière, il eut l'idée de faire en sorte que cette confrontation porte sur les nanotechnologies en pleine ébullition, mais dont on ignorait jusqu'à la définition. C'était en fin 2006, une année où l'on ne pouvait rien trouver sur les nanos en faisant une recherche *Google*. Les choses ont changé depuis et j'ai eu la chance de rencontrer Serge Robert quelques mois plus tard, lors des séminaires qu'il donnait à l'Université Joseph Fourier. Grâce à lui, cette thèse a pris une tournure philosophique qui s'est élargie puis réajustée en renonçant à Popper et Laudan tout en s'enrichissant de Hacking et Austin. Soyez tous remerciés pour vos apports aussi divers qu'indispensables !

Merci aussi du fond du cœur à tous les professeur-e-s qui m'ont fait l'honneur de participer à mes jurys de thèse, de projet de thèse et de l'examen doctoral. Il s'agit, outre mes deux directeurs de thèse, de Bernadette Bensaude-Vincent, Anouk Barberousse, Céline Lafontaine, Yves Gingras, Christophe Malaterre et Pierre Poirier pour leurs critiques bienveillantes quoique sans complaisance. Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des membres de Philosophie Langage et Cognition (PLC) de l'Université Pierre Mendès France (UPMF) de 2007 à 2010, enseignants, étudiants et les membres de l'équipe, en particulier Mme Loredana Truong, Mme Valérie Perret, au Service des relations internationales de l'UPMF,

notamment Mmes Blandine Montagnon dont la détermination a rendu possible cette cotutelle, Marie-Claude Buffière, Céline Debanne ainsi que Monique Galigné partie à la retraite avant l'aboutissement de cette thèse dont elle a facilité le déroulement, à mes amies la bienveillante Anna Zielinska, la gentille Emilietta Murgia, mon ami et témoin Sylvain Letoffé, mes collègues Rémi Clot-Goudard, Karine Laborie, Emmanuelle Rozier, les professeurs Sophie Roux mon premier contact au département, le généreux Max Kistler, le sage Jean-Yves Goffi, Ion Vezeanu avec qui je partage cette passion pour les nanos, mais aussi Isabelle Joncour de l'Université Joseph Fourier.

À nos collègues du Laboratoire d'ANalyse Cognitive de l'Information (LANCI), Jean-François Chartier, Maxime Sainte-Marie, Nicolas Payette, Janie Brisson et particulièrement Daniel Roussin, Martin Ratte, Caroline Bergeron, Louis Chartrand, Davide Pulizzotto et Hassoune Karam, qui ont contribué à la construction de cette thèse grâce à l'intérêt qu'ils lui ont porté et aux nombreuses questions qui n'ont pas manqué de me stimuler. Grand merci à mes étudiants de l'Institut de Technologie Agroalimentaire (ITA) de l'automne 2012 et 2013 à qui j'espère avoir transmis le goût de la réflexion philosophique, à mes collègues de la formation générale, en particulier ceux de philosophie, Josée Brunet mon *coach*, Sylvie Laramée, François Laliberté, Serge Godin et Maxime Bonin, mais aussi Germain Pelletier pour sa grande générosité, son ouverture d'esprit et sa sagesse.

Je ne saurais omettre mes anciens élèves ainsi que mes collègues assistants d'éducation du collège Jules Vallès et ceux de Fantin Latour sans oublier nos CPE Messieurs Gontard et Dumolard, leurs patrons Jean-Christophe Ployon et Guy Barret ainsi que leurs adjointes respectives, Mesdames Florence Lavau et Corinne Degroote pour leur respect et leur confiance. J'ai aussi une pensée positive pour mes jeunes pensionnaires en programme de réinsertion social de l'établissement *Les Carlins*, de la petite ville d'Autrans, qui portent bien leur nom : « chardons argentés de la famille des artichauts sauvages. Ils sont recouverts d'épines et ils sont difficiles à saisir. Quand on sait les prendre, on découvre qu'ils ont le cœur tendre ».

Merci Patrick Gaillard de m'avoir donné l'opportunité, entre 2006 et 2007, de découvrir le travail social et sanitaire de l'intérieur et de faire la connaissance de personnes formidables qui, à vos côtés, ont misé sur l'avenir de ces jeunes plutôt que de les ferrer fatalement à leur passé. Je les remercie tous, de la cuisine aux ateliers en passant par les dortoirs, en particulier Michèle Jadot, Richard Mercier et mon ami Éric Francon ainsi que sa belle petite famille. Mes respects à l'ensemble des membres de l'Association Beauregard, responsable de cette belle initiative, notamment cet internat, avec des classes de remise à niveau et des ateliers de formation professionnelle, qui se consacre à l'accueil de jeunes présentant des troubles de la conduite et du comportement, à travers son Directeur, Pierre Julien.

Enfin, je ne saurais taire le soutien et l'accompagnement de l'État du Sénégal pour avoir veillé à ce que j'aie une formation de qualité en dépit de ses conditions difficiles à bien des égards, la contribution de la région Rhône Alpes à travers la bourse EXPLORADOC 2007 qu'elle m'a attribuée, puis l'appui de la bourse d'excellence du Fonds à l'accessibilité et à la réussite (FARE) qui m'a été octroyée durant au moins deux années consécutives et celui de la Faculté des lettres et sciences humaines de l'UQÀM pour la bourse d'exonération des frais de scolarité offerte en 2008. Mes remerciements vont aussi aux fonds du groupe Compétence Logique, Inférences et Cognition (CLIC) du Pr Serge Robert ainsi qu'aux nombreuses aides et subventions du laboratoire Philosophie, Langage et Cognition (PLC) sous la direction du Pr Denis Vernant. Ce dernier d'abord, le premier ensuite m'ont fait l'honneur de me concéder leur confiance et m'ont accordé le privilège de m'accompagner dans cette aventure doctorale parsemée d'embûches. Vous avez été pour moi des guides inespérés et d'une patience exceptionnelle dans l'accomplissement de cette tâche. Je remercie également le Département de Philosophie de l'UQÀM à travers Dario Perinetti, Francine Pichette, Claire Roussel, ainsi que le Laboratoire d'ANalyse Cognitive de l'Information (LANCI) pour les nombreuses tâches rémunérées que ses directeurs, Serge Robert, Pierre Poirier, Jean-Guy Meunier et Luc Faucher, ont bien voulu me confier durant toute la durée de mon séjour à l'UQÀM. Merci infiniment à toutes et à tous pour tout.



## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES.....	xiii
RÉSUMÉ .....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I	
DE L'ORIGINE DES NANOS : DU RÊVE À LA RÉALITÉ.....	28
1.1. L'étymologie en question.....	29
1.1.1. Les tenants de l'origine grecque du préfixe nano .....	30
1.1.2. En quoi l'étymologie est-elle latine ?.....	33
1.2. Les signes des précurseurs .....	38
1.2.1. Petite histoire de la miniaturisation.....	39
1.2.2. Démocrite d'Abdère candidat à la paternité des nanos .....	40
1.2.3. Napoléon, précurseur des nanotechnologies ? .....	42
1.2.4. L'origine de l'idée serait-elle états-unienne (Feynman) ? .....	45
1.2.5. La loi de Gordon Moore... une prédiction empirique de type inductiviste .....	51
1.2.6. "More Moore" ou "No more Moore" .....	57
1.3. L'avènement d'une technologie à l'échelle de l'atome .....	60
1.3.1. Les instruments de l'exploration de l'infiniment petit.....	61
1.3.2. Perspectives ouvertes par ces nouveaux instruments d'« observation » .....	67
1.4. Les manifestations supposées des nanos à travers l'histoire et dans la nature .....	73
1.4.1. Des nanos dans l'histoire .....	73
1.4.2. Des nanos dans la nature .....	75

CHAPITRE II	
DÉFINIR LES NANOTECHNOLOGIES.....	78
2.1. Miniaturisation vs monumentalisation.....	81
2.1.1. Miniaturisation ( <i>top-down</i> ).....	82
2.1.2. Monumentalisation ( <i>bottom-up</i> ).....	85
2.2. Revue générale des différents types de définition.....	90
2.2.1. Examen de quelques définitions.....	90
2.2.2. Typologie des définitions.....	92
2.3. La question des enjeux au cœur des définitions.....	103
2.3.1. Les enjeux de la course aux nanos.....	104
2.3.2. Problèmes de définition des nanotechnologies : autres enjeux.....	108
2.4. Les nanotechnologies : de la science à la nanotechnoscience.....	113
2.4.1. Entre ontologie et métaphysique des nanos.....	114
2.4.2. Science et/ou technologie : vers la nanotechnoscience.....	123
2.5. Définir les nanotechnologies.....	138
2.5.1. Deux contraintes et trois paramètres pour une définition.....	139
2.5.2. L'apport des nouveaux outils qui ont ouvert le champ des nanos.....	142
2.5.3. Effets d'échelle, changements de propriétés et nanotechnoscience.....	144
2.6. Conclusion.....	151
CHAPITRE III	
THÉORIE DES PARADIGMES ET NANOTECHNOSCIENCES.....	155
3.1. La théorie des paradigmes de Kuhn.....	156
3.1.1. Préparadigme et paradigme.....	157
3.1.2. La phase postparadigmatique, prélude du progrès.....	166
3.1.3. Conclusion.....	175
3.2. Kuhn à l'épreuve de la technoscience.....	176
3.2.1. Les dispositifs technologiques dans la théorie de Kuhn.....	178
3.2.2. Relations entre technologie et théorie.....	185
3.2.3. Organe de connaissance et « organon » de science.....	193

3.2.4. Nouvel usage, nouveaux développements scientifiques .....	197
3.2.5. Conclusion : les raisons de la technologie externalisée .....	199
3.3. Limites de l'approche kuhnienne face à la nanotechnoscience .....	202
3.3.1. Nanotechnoscience et technologie .....	202
3.3.2. Technologie et paradigme .....	205
3.3.3. Les raisons de l'externalisation de la technologie .....	210
3.3.4. Conclusion : non « paradigmaticité » de la nanotechnoscience.....	211
3.4. Conclusion .....	212
CHAPITRE IV	
QUELLE HEURISTIQUE POUR LES NANOTECHNOSCIENCES ? .....	217
4.1. Programme de recherche et correctionnisme .....	219
4.1.1. Modèle lakatosien et science.....	219
4.1.2. Modèle robertien et science .....	237
4.2. Programme de recherche, correctionnisme et technologie .....	258
4.2.1. Lakatos et les technologies.....	259
4.2.2. Robert et les technologies .....	270
4.3. Conclusion .....	285
CHAPITRE V	
REPRÉSENTER ET INTERVENIR OU INTERVENIR	
ET REPRÉSENTER ? .....	289
5.1. De la science qui représente.....	297
5.1.1. Le représentationnalisme de Kuhn vu par Hacking .....	297
5.1.2. Lakatos vu par Hacking .....	302
5.2. ... à la science qui intervient.....	316
5.2.1. Théorie et expérience .....	319
5.2.2. De l'observation à la techno-observation .....	328
5.3. Conclusion .....	348
CONCLUSION .....	359
BIBLIOGRAPHIE .....	389

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Dates importantes dans l'histoire des communications humaines (Cressler, John D. 2009. <i>Silicon Earth: Introduction to the Microelectronics and Nanotechnology Revolution</i> , Figure 2.1.4.1 partiellement traduite par nos soins, p. 5.).....	55
Figure 1.2 : La coupe de Lycurgue .....	75
Figure 2.1 : Page de couverture de la brochure Nanotechnology: shaping the World Atom by Atom, NSTC, 1999. ....	119
Figure 2.2 : « Changing the societal “fabric” towards a new structure (upper figure by R.E. Horn) » (Figure emprunté au texte de Roco et Bainbridge, <i>Converging Technologies for Improving Human Performance</i> , éd. Kluwer Academic Publisher, Netherlands 2003, p. vii).....	123
Figure 2.3 : Énumération des normes de la science académique vs industrielle (Kellogg, 2006, Table 1, p. 12). ....	131
Figure 2.4 : Séparation entre science académique et science industrielle (Kellogg 2006, Figure 1, p. 13).....	132
Figure 2.5 : La science post-académique (Kellogg 2006, Figure 2, p. 20).....	134
Figure 2.6 : Schéma des interactions entre sciences & technologies – Nanotechnoscience – Nanoscience & Nanotechnologie.....	137
Figure 4.1 : Le système total de la connaissance selon Serge Robert, <i>Les mécanismes de la découverte scientifique</i> , p. 120 .....	253
Figure 4.2 : Diagramme lexicographique comparatif de Kuhn (1983), Lakatos (1978a) & Robert (1993).....	275

## LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ACFAS. : Association Canadienne Française pour l'Avancement de la Science

ADN : Acide désoxyribonucléique

AFM : Atomic Force Microscopy

ARN : Acide ribonucléique

CEMES : Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales

CIRADE : Centre Interdisciplinaire de la Recherche sur l'Apprentissage et le Développement en Éducation

CUDOS : Communalist Universal Disinterested Original Skeptical (Science académique)

DPN : Dip Pen Nanolithography

IBM : International Business Machines

LSE : London School of Economics

MFM : Magnetic Force Microscopy

MIT : Massachussets Institute of Technology

NBIC : Nanotechnology Biotechnology Information Cognition

NDBP : Note de bas de page

NSF : National Science Foundation

NSL : Nanosphere Lithography

OGM : Organisme Génétiquement Modifié

PLACE : Proprietary Local Authoritarian Commissioned Expert (Science industrielle)

R&D : Recherche et Développement

R&DNTS : Recherche & Développement Nanotechnoscientifique

SNOM : Scanning Near Field

STM : Scanning Tunneling Microscopy

STS : Science Technology and Society

TIC : Technologie de l'information et de la communication

U.CAD : Université Cheikh Anta Diop

UQÀM : Université du Québec à Montréal



## RÉSUMÉ

Cette thèse porte sur l'examen d'une question que l'avènement des nanotechnologies rend de plus en plus pressante pour la philosophie en général et la philosophie des sciences en particulier. Elle prend les allures d'une critique de cette dernière en se fondant sur quelques théories philosophiques, représentatives et suffisamment originales sur la science, développées par Thomas Kuhn, Imre Lakatos, Ian Hacking et Serge Robert. Les différents discours sur les nanos et plus précisément le concept de nanotechnologie se sont révélés, à tout le moins, polysémiques et décrivent parfois prématurément une activité qui au sens strict n'existe pas encore. Ainsi, nous avons requalifié le concept de nanotechnologie en « nanotechnoscience » et proposé une définition plus rigoureuse mettant l'accent sur la nature hybride de cette activité, à la fois théorique et pratique, scientifique et technologique. Puis nous avons confronté les philosophies des sciences que nous avons retenues aux fins de les mettre à l'épreuve de ce qui apparaît comme un impensé de leurs philosophies, notamment la dimension technologique de la science souvent connue et reconnue, mais « sous-traitée » et reléguée au mieux au second plan. Nos recherches ont donc porté sur chacune des philosophies que nous avons annoncées, sur les nanotechnosciences elles-mêmes, la philosophie de la technologie, mais aussi sur celle naissante des technosciences et des nanotechnosciences sans oublier notre ouverture à des fins heuristiques sur la philosophie du langage d'Austin et la praxéologie de Denis Vernant. Dans cette étude, nous avons traité d'étymologie, d'histoire du préfixe *nano* et de définition. Puis, nous avons examiné attentivement les différentes philosophies des sciences par lesquelles il nous a paru pertinent d'examiner les nanotechnosciences émergentes afin de voir ce qui dans ces doctrines permettrait d'envisager une réflexion philosophique sur les nanos. Sachant que ces pensées privilégient la représentation sur l'intervention, nous nous sommes posé la question de la place de la technologie dans ces systèmes philosophiques avec l'idée que la technologie est une condition nécessaire quoique non suffisante de toute philosophie à prétention technoscientifique ou nanotechnoscientifique. C'est dans cette optique que nous avons sollicité la théorie des paradigmes, puis celle du falsificationnisme sophistiqué revu et corrigé par le correctionnisme de Robert avant de tenter l'interventionnisme de Hacking. Au cours de cet exercice, nous avons pu constater l'omniprésence de la technologie tout comme l'hétérogénéité de la place qui lui est accordée dans ces théories philosophiques. Ainsi de Kuhn à Hacking, la reconnaissance du rôle et de la place de la technologie va crescendo, au point de nous inviter à penser les nanotechnosciences en termes d'« actes de discours ». L'enchevêtrement ou l'entrelacement entre science et technologie nous a inspiré deux analogies : la première avec l'idée de « contexte de performance oral » de Mamoussé Diagne analogue elle-même à la seconde, la performativité introduite et initiée par les réflexions d'Austin sur le discours ordinaire. Notre investigation prend les allures d'une mise à l'épreuve de toutes ces

philosophies à l'aune de la place qu'occupe la technologie dans leurs systèmes respectifs. Pour ce faire, nous avons eu recours à l'analyse comparative des discours philosophiques sur la science ainsi que ce que nous avons appris sur les pratiques scientifiques, le tout complété par une approche lexicométrique basée sur le corpus des principaux ouvrages de Kuhn, Lakatos, Robert et Hacking. Notre démarche nous a amené à mettre en cause l'étymologie du préfixe *nano* trop hâtivement attribuée au grec alors qu'il serait plus à propos de la considérer comme latine, puis nous avons tenté d'établir l'idée que les « nanotechnologies » n'existent pas et que ce que l'on appelle bien souvent ainsi relève d'un abus de langage et d'une sorte d'anachronisme inversée. De cette critique nous avons tenté de tirer des leçons qui ont inspiré la requalification conceptuelle de l'activité qu'est censé désigner ce morphème en « nanotechnoscience » que nous avons redéfini en tenant compte de plusieurs facteurs déterminants. Ceci établi, à l'issue de cette analyse, nous avons pu affirmer que ni la philosophie de Kuhn, ni celle de Lakatos, ni celle de Robert ne laissent suffisamment de place à la technologie pour se positionner comme philosophie des technosciences. Celle qui semble la plus adéquate est l'interventionnisme défendu par Hacking, mais auquel Gilbert Hottois reproche de n'avoir pas franchi le pas qui l'aurait mené à une philosophie des technosciences authentique. C'est alors que des pistes vers Bacon ou Peirce sont suggérées respectivement par Hacking (1983) puis Schmidt (2011) et par Nordmann (2012). En ce qui nous concerne, sans nous prononcer sur ces choix, nous indiquons la voie vers la construction d'une « nanophilosophie » qui s'inspirerait essentiellement de la philosophie du langage oral (Diagne, 2005), du discours ordinaire (Austin, 1962) et de l'action transactionniste (Vernant, 2009). En définitive, cette analyse a fini d'établir que les philosophes des sciences doivent sortir des clivages qui les confinent dans des carcans et les opposent en représentationnalistes vs interventionnistes de façon trop réductrice, bien souvent, et envisager leur relation au monde technoscientifique, ou simplement scientifique, plus en termes d'hybridité et d'enchevêtrement afin de mieux appréhender toutes les dimensions de la science, tant la représentationnelle que l'interventionnelle. Les nanotechnosciences indiquent une voie d'ouverture et de complémentarité presque ontologique plutôt que des clivages ou des subordinations qui trahissent, malgré nous, nos idéaux d'égalité et de respect par la diversité.

Mots clés : Philosophie des sciences, technoscience, nanotechnoscience, épistémologie, nanotechnologie, politique de la science, politique scientifique, transactionnisme



## ABSTRACT

This thesis focuses on the consideration of a question that the advent of what is called nanotechnology makes it increasingly urgent to philosophy in general and the philosophy of science in particular because of the inexistence of the "nanotechnology" *stricto sensu*, the lack of good definition and the default of something like a "nanophilosophy". It takes on the appearance of a critique of the latter based on some philosophical, representative and sufficiently original theories of science, developed by Thomas Kuhn, Imre Lakatos, Ian Hacking and Serge Robert. Different discourses on nanos and more specifically the concept of nanotechnology proved, at least, polysemous and sometimes describe an activity which in the strict sense does not exist prematurely. Thus, we have reclassified the concept of nanotechnology "nanotechnoscience" and proposed a more rigorous definition emphasizing the hybrid nature of this activity, both theoretical and practical, scientific and technological. Then we compared the philosophies of science that we have selected to make them confront what appears to be an unthought of their philosophies, including the technological dimension of science often known and recognized, but "outsourced" and relegated to better secondary. Our research has therefore focused on each of the philosophies that we announced on the nanotechnosciences themselves, philosophy of technology, but also on emerging technosciences and nanotechnoscience not forgetting our opening for heuristic purposes on the philosophy of language of Austin and praxeology of Denis Vernant. In this study, we treated etymology, history of the prefix *nano* and definition. Then, we carefully examined the different philosophies of science which seemed appropriate to consider the emerging nanotechnosciences so as to see what in these doctrines would help envisaging a philosophical reflection on the Nano. Knowing that these thoughts favor representing rather than intervening, we questioned the role of technology in these philosophical systems with the idea that technology is a necessary though not sufficient condition for any claim of technoscientific or nanotechnoscientific philosophy. It is in this context that we solicited the paradigms theory, then the sophisticated falsificationism reviewed and corrected by Robert's correctionism before attempting interventionism Hacking's interventionism. During this exercise we have seen the pervasiveness of technology as well as the heterogeneity of the place it is granted in these philosophical theories. So from Kuhn to Hacking, recognition of the role and place of the technology is going *crescendo* to the point of inviting us to think the nanotechnosciences in terms of "speech acts". The entanglement or intertwining between science and technology inspired us two analogies: the first with the idea of "context of oral performance" by Mamoussé Diagne, analogous itself to the second, performativity introduced and initiated by Austin's reflections on ordinary language. Our investigation takes on the appearance of a testing of all these philosophies in terms of the place of technology in their respective systems. To achieve this, we resorted to the

comparative analysis of philosophical discourse on science and what we have learned about scientific practices, complemented by a lexicometric approach based on the corpus of the principal works published from Kuhn, Lakatos, Robert and Hacking. Our approach has led us to question the etymology of the prefix *nano* too hastily attributed to the Greek when it would be more appropriate to consider it as Latin, then we tried to establish the idea that "nanotechnology" does not exist and that what is often called so constitutes an abuse of language and a kind of reverse anachronism. From this critique we have tried to draw lessons that inspired the conceptual requalification of the activity that this morpheme is intended to mean into "nanotechnoscience" which we have redefined taking into account several factors. This established at the end of this analysis, we could say that neither the philosophy of Kuhn or Lakatos, nor that of Robert leave enough space for technology to position itself as philosophies of technosciences. The one which seems the most appropriate is the interventionism defended by Hacking, but which Gilbert Hottois criticized for not having taken the step that would have led to a philosophy of authentic technosciences. It was then that tracks to Bacon and Peirce are suggested respectively by Hacking and Schmidt and Nordmann. As regards us, without commenting on these choices, we show the way towards building a "nanophilosophie" along the lines essentially in the philosophy of oral language of ordinary discourse and the transactionist action. Ultimately, this analysis has come to establish that philosophers of science must leave the divisions that confine them in shackles and opposed them by representationalistics vs interventionists in too reductive way, in many cases, and consider their relationship to the technoscientific world, or simply scientific one, more in terms of hybridity and entanglement in order to better understand all aspects of science, both the representational than the interventional. The nanotechnosciences indicate a path to openness and almost ontological complementarity rather than subordination or divisions which betray, despite ourselves, our ideals of equality and respect in diversity.

**Keywords:** Philosophy of science, technoscience, nanotechnoscience, epistemology, nanotechnology, science policy, scientific policy, transactionism



## INTRODUCTION

Parmi les nombreuses questions que pose l'intrusion des « nanotechnosciences », communément appelés nanotechnologies, dans la géographie de notre connaissance, celles auxquelles nous allons tenter d'apporter des réponses dans le présent travail, sont relatives à l'effectivité d'un passage à un nouveau « paradigme » ou « programme de recherche » et à la nature de cette nouveauté.

Il semble que les nanotechnologies soient porteuses de changements et de nouveautés tellement inouïes qu'elles ont surpris les scientifiques les plus avertis. Les premiers à avoir trouvé cette science émergente « révolutionnaire » sont des scientifiques et ingénieurs américains comme Éric Drexler qui, après l'invention du microscope à effet tunnel par des ingénieurs d'IBM, est passé de l'étalage de merveilleuses promesses autorisées par la découverte du nanoscope à celui des conséquences désastreuses qui pourraient résulter de la maîtrise de l'échelle nanométrique ou de son mauvais usage par l'humain (Drexler, 1986). Dans cette même veine, d'autres scientifiques et auteurs de fictions ont pu développer des *scenarii* plus audacieux les uns que les autres. Par ce fait, ils ont contribué à la construction de toutes sortes de fantasmes autour des nanotechnologies, des plus alarmistes (Michael Crichton, 1996) aux plus utopistes (Roco et Bainbridge, 2003). C'est dans ce contexte particulier de l'avènement d'une activité scientifico-technologique à la croisée des sciences existantes irréductibles à l'une d'entre elles qu'émergent toutes sortes de questionnements sur les nanotechnologies. Quelle est leur nature ? Qu'apportent-elles à la société ? Il convient de noter que cette bulle qui s'est formée autour des nanotechnologies a été nourrie par l'histoire des sciences contemporaines, du nucléaire aux organismes génétiquement modifiés (OGM) en passant par les désastres de l'amiante. Autant dire que les opinions

publiques mondiales n'ont pas retenu que les bons côtés des « progrès » scientifiques du début du XX<sup>e</sup> siècle et que l'avènement des nanotechnologies a servi de catalyseur à l'expression d'une conscience scientifique, voire antiscientifique. Le citoyen ne se contente plus d'être le consommateur passif de la science à travers les explications et les découvertes de celle-ci, mais il s'arroge le droit de lui demander des comptes sur ses activités, ses résultats ainsi que sur ses projets. C'est cet engagement que reflète la prolifération d'organisations bénévoles et non gouvernementales de plus en plus nombreuses.

Ainsi, depuis l'avènement des nanotechnologies, énormément de choses se sont passées tant d'un point de vue scientifico-technologique qu'aux plans politique, économique et social. Jamais on n'avait vu auparavant une telle effervescence autour d'une « science » qui, à défaut de faire l'unanimité, joue un rôle de catalyseur pour l'essentiel des disciplines scientifiques de notre époque. Elle met d'accord autant ses partisans que ses détracteurs sur le fait que le vingt-et-unième siècle se construira autour d'elle et avec elle, nonobstant l'opinion que l'on pourrait s'en faire. C'est la compréhension des enjeux que recèlent les nanotechnologies qui pousse les acteurs politiques, les industriels et les financiers à investir massivement dans tout programme de recherche affublé du préfixe « nano ». La course aux nanotechnologies est officiellement lancée en 2001 par le gouvernement de Bill Clinton.

Dans ce contexte officiellement « nanophile », voire « nanophage », l'essentiel des sujets abordés par les philosophes qui font des travaux sur les nanotechnologies porte davantage sur les questions éthiques ou sociétales que sur les aspects épistémologiques. Il faut reconnaître tout de même qu'en France, par exemple, des groupes de recherche se sont formés, autour de Bensaude-Vincent notamment, et s'organisent afin de prendre à bras le corps les questions philosophiques relatives à cette nouvelle discipline qui se constitue sous nos yeux et dont nous sommes des témoins privilégiés. À travers Nano2e dont les deux « e » sont mis pour « éthique » et « épistémologie », Bensaude-Vincent et ses collègues se proposent de combiner

réflexion éthique et étude des objets « *nano* » en se focalisant sur leur mode de production en laboratoire. Leur objectif est, selon les termes mêmes de leur programme, « d'étayer le travail normatif sur une compréhension détaillée des pratiques matérielles – c'est-à-dire de proposer une réflexion éthique arrimée à une analyse épistémologique<sup>1</sup>. » Cependant, force est de constater que c'est aux États-Unis que l'on trouve la plus grande diversité de publications philosophiques sur les nanotechnologies (Nordmann (2012, 2006, 2004), Schummer et Baird (*editors*) (2006), Baird (2010, 2002*a*, 2002*b*), Radder, Hans et al. (2003)), même si l'effervescence autour des questions touchant le sujet est planétaire (Kastenhofer et Schmidt, (2011), Dupuy (avril 2004), Dupuy et Roure (2004), etc.).

À la fin du dernier chapitre de son ouvrage, *Du discours à l'action*, Denis Vernant (1997, p. 172), reprenant Wittgenstein qui lui-même reprenait Goethe, terminait son propos en affirmant de façon péremptoire : « Au commencement était l'action. » Nous allons voir qu'une certaine vision épistémologique des nanotechnologies pourrait nous autoriser à parodier cette assertion de Vernant dans un registre différent du sien : « aujourd'hui est l'action. » Peut-être en a-t-il toujours été ainsi. L'avènement des « nanotechnologies » a provoqué des changements importants dans l'univers des sciences et des technologies (ou est sur le point de le faire) et a ouvert des débats d'envergure dans la société (débats publics mouvementés en France du 15 octobre 2009 au 24 février 2010<sup>2</sup>, par exemple) et dans les cercles des spécialistes scientifiques en général, mais particulièrement, dans les sciences humaines, notamment en philosophies et en sociologie des sciences. Notre point dans ce travail de thèse peut être entendu de la manière suivante : de tels bouleversements rendent inévitable la question de la nature de cette nouveauté dont on n'a pas encore fini de mesurer l'impact dans nos sociétés. En effet, elle semble être porteuse de dimensions nouvelles qui, tout en paraissant familières aux philosophes, ne semblent pas cadrer parfaitement avec des philosophies des

<sup>1</sup> [http://nano2e.org/?page\\_id=39](http://nano2e.org/?page_id=39) (accédé le 08/01/2011).

<sup>2</sup> Voir à ce propos le site officiel du débat public sur les nanotechnologies en France : <http://www.debatpublic-nano.org/> (accédé le 8/01/2011).

sciences telles que celles de Kuhn, Lakatos, Robert et Hacking, en particulier à cause de la dimension technologique intrinsèque aux nanotechnosciences. Bien entendu, ces théories philosophiques n'ont pas été choisies au hasard, mais à cause de leur conception moins puriste de la science que celle d'autres philosophes comme Karl Popper, par exemple. Mais encore, parce que, vues sous leurs œillères, les nanotechnologies semblent correspondre à un moment particulier dans l'histoire des sciences, celui que Kuhn a identifié sous le nom de « changement de paradigme » et que Lakatos et Robert décrivent différemment. Quant à Hacking, Hans Radder (2003) considère qu'il a été l'initiateur de ce qu'il appelle la « philosophie de l'expérimentation scientifique<sup>3</sup> » qui, après lui, a perdu beaucoup de son élan au cours de ces deux dernières décennies. Ce sont précisément ces débats qui nous semblent relancés de façon plus pressante avec l'avènement des « nanotechnologies ».

En outre, Charles Bazerman, dans son ouvrage *Shaping Written Knowledge: The Genre and Activity of the Experimental Article in Science*, considérait Toulmin, Kuhn, Karl Popper, Imre Lakatos, Ian Hacking ainsi que Fleck comme les philosophes les plus pertinents pour sa compréhension des disciplines scientifiques et des changements disciplinaires (Bazerman, 1988, p. 4). Dans cet examen qui s'intéresse à la disciplinarité des nanotechnologies ainsi qu'aux changements impliqués par leur caractère présumé atypique, nous comptons nous inscrire dans le même sillage que Bazerman afin de confronter principalement Kuhn, Lakatos et Hacking avec cette nouvelle discipline. Du coup, la diversité, voire les divergences entre ces différentes théories, représente pour nous un atout plutôt qu'un problème pour la confrontation à laquelle nous comptons les soumettre. Nous espérons ainsi comprendre la scientificité des nanotechnologies si les critères de nos spécialistes

---

<sup>3</sup> Selon Radder en effet : « The development of the philosophy of scientific experimentation over the past twenty years has two main features. After a rapid start in the 1980s (see Hacking 1989a), it seems to have lost much of this momentum during the next decade. At the very least, the expectation that the study of experiment would become a major issue within received traditions in philosophy of science has not been fulfilled. » Hans Radder, *The Philosophy of Scientific Experimentation*, University of Pittsburgh Press, 1<sup>st</sup> edition (February 23, 2003), p. 1.



le permettent ou alors mettre à jour, à tout le moins, leur non-scientificité au sens strict afin de mieux les classer. Ainsi, à défaut de circonscrire de façon péremptoire le concept de nanotechnologie, nous espérons contribuer à mieux le définir.

Ainsi, les philosophes que nous avons invités à l'examen du problème posé par les derniers développements de l'instrumentation nous ont paru figurer parmi les plus à même de nous aider à esquisser les réponses dont nous projetons ici d'examiner la pertinence avant de suggérer une nouvelle voie que nous comptons emprunter à la philosophie du langage, comme Kuhn l'avait déjà fait auparavant en introduisant le concept d'« incommensurabilité ». Bien entendu, les analyses de philosophes, comme Alfred Nordmann (2004, 2008), Davis Baird (2002, 2004), Joachim Schummer & Baird (2006) et Hans Radder (2003), nous seront d'une grande utilité dans le dialogue que nous comptons établir sur la façon la plus appropriée d'appréhender les nanotechnologies ainsi que pour la construction de l'alternative épistémologique dont nous comptons au moins poser les jalons.

Dans cette optique, nous entendons la « technologie » comme tout dispositif technique matériel plus ou moins complexe pouvant être scientifiquement ou technologiquement orienté, au sens habituel où l'on entend ces termes. Elle peut aussi être socio-politiquement ou pratiquement (fonctionnellement) chargée. Lorsqu'elle est orientée vers l'activité scientifique, la technologie peut être destinée à l'observation, à la mesure, aux tests ou expérimentations de toutes sortes. Elle peut ainsi être au service d'une théorie préalable tout comme elle peut inspirer ou être à l'origine d'une nouvelle théorie qui peut se construire à partir d'elle, autour d'elle ou avec elle. Quand elle est socio-politiquement orientée, elle peut avoir des implications sociétales, politiques, économiques et/ou militaires plus évidentes. D'où la popularité de ce dernier sens qui, bien souvent, occulte le premier pourtant tout aussi fondamental. C'est conscient de cette diversité des déclinaisons du concept de « technologie » et de ses implications que Loeve (2009), dont la thèse porte précisément sur « Le concept de technologie à l'échelle des



molécules-machines », distingue le point de vue épistémologique du culturel<sup>4</sup>. Il soutient ainsi qu'alors que d'un point de vue épistémologique, le concept de « technologie » dans « nanotechnologies » désigne une gamme de pratiques de *design* pas toujours utilitaires et concomitamment une activité cognitive non essentiellement théorique, produisant ainsi à l'échelle nanométrique des connaissances traversant plusieurs champs disciplinaires sans s'atteler directement à la résolution de problèmes théoriques posés par un paradigme scientifique préalable ; d'un point de vue culturel, la technologie se localise au cœur de l'activité scientifique sans se subsumer ni à la science ni à ses significations sociales.

Dans un tel contexte dominé par la polysémie, il ne serait pas fortuit pour nous de préciser que nous entendons par « technologie » ce sens englobant qui en fait à la fois une dimension de la théorie et de la pratique. Lorsque nous recourons à ce concept dans le cadre de ce travail de recherche, c'est à ce sens que nous référons principalement. À cet égard, nous nous reconnaissons dans ce que Serge Latouche (2004, p. 38) appelle « l'aspect purement technique de la technique » qu'il attribue à la conception des économistes en général, qui est assez proche du sens du dictionnaire *Larousse* la définissant notamment comme « ensemble des procédés et des méthodes d'un art, d'un métier, d'une industrie. » Cependant, Latouche considère cette façon d'entendre la technique comme comportant trois limites au moins, que nous assumons, et particulièrement la troisième dont il dit qu'elle « limite la technique au seul domaine de la production conçue comme production d'objets (matériels). » (Latouche, 2004, p. 35). Dans cette optique, « la technique se réduit à l'outil, à l'instrument, à la machine qui sert de médiateur dans l'opération

---

<sup>4</sup> Voici ce que dit précisément Loeve (2009, p. 9) à ce sujet : « D'un point de vue épistémologique, le concept de « technologie » dans « nanotechnologies » désigne une gamme de pratiques de *design* pas nécessairement utilitaires et, indissociablement, une activité cognitive non prioritairement théorique. La technologie à l'échelle nano produit des connaissances traversant les champs disciplinaires de la chimie, de la biologie et de la physique, mais elles ne sont pas directement au service de la résolution de problèmes théoriques posés dans le cadre d'un paradigme scientifique donné. Les nano-objets ne sont ni de purs faits naturels, ni de purs artefacts, mais des machines épistémiques inséparables des dispositifs mis en œuvre pour les individualiser. D'un point de vue culturel, la technologie niche au cœur de l'activité scientifique mais ne se réduit ni à la science ni à ses significations sociales. »

de fabrication. » (Latouche, 2004, p. 35). Le but est pour nous d'insister sur cette dimension matérielle qui est une constituante essentielle des nanotechnosciences. Et, ce, d'autant plus que celle-ci semble concorder avec l'idée d'« épistémologie matérielle » défendue par Davis Baird (2004) dans son ouvrage au titre évocateur : *Thing Knowledge: A Philosophy of Scientific Instruments*. Ce dernier considère que la « *thing knowledge* » est dans les choses, non dans les esprits, dans les instruments et non dans les croyances qui portent ce type de connaissance. Ces choses tout en étant matérielles fonctionnent comme des théories (Baird<sup>5</sup>, 2003, p. 45). Et, à notre sens, c'est cet aspect de la science, à la fois *theory laden* (Hanson, 1959) et *technology laden*, qui a été, non pas forcément occulté par la plupart des philosophes des sciences depuis Hanson lui-même et bien avant lui, mais négligé ou « accessorisé » au point que leurs philosophies ne sont pas capables de prendre en charge efficacement une activité aussi manifestement hybride que les nanotechnosciences. Ces dernières, en effet, flirtent à la fois avec la représentation et l'intervention au point de rendre nos idées traditionnelles sur les frontières entre science et technique totalement artificielles et surfaites, les faisant tomber en désuétude pour le coup. Cependant, ce qui pourrait apparaître comme un « flou » aux yeux des tenants de l'ordre classique ayant consacré la dichotomie entre science et technologie est en réalité la manière d'être de l'activité nanotechnoscientifique telle que nous l'entendons ici. À cet égard, ce bouleversement dans l'ordre de nos repères cognitifs et épistémologiques n'est pas sans rappeler la controverse autour de la nature de la lumière qui a longtemps été considérée comme étant de nature corpusculaire par les newtoniens d'un côté, alors que les huygensiens en défendaient la nature ondulatoire. Ce n'est finalement qu'avec les développements de la mécanique quantique qu'un compromis assez proche de celui auquel nous référons à propos des nanos a été trouvé puis validé par Louis de Broglie et Erwin Schrödinger qui ont conçu la théorie de la dualité onde-particule ayant permis de concilier ces deux positions naguère antagonistes.

---

<sup>5</sup> Texte de Davis Baird qui a précédé son ouvrage éponyme, « *Thing Knowledge: Outline of a Materialist Theory of Knowledge* », In *Philosophy of Scientific experimentation*, ed. H. Radder, 39-68. Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press, 2003. Texte accessible sur le lien suivant : [http://lemida.biu.ac.il/pluginfile.php/183261/mod\\_resource/content/2/Baird%202003.pdf](http://lemida.biu.ac.il/pluginfile.php/183261/mod_resource/content/2/Baird%202003.pdf).

Des multiples questions posées par les « nanotechnologies », la moins préoccupante n'est pas celle de la nature de ce nouvel univers de nos savoirs et de nos savoir-faire, ni celle de sa caractérisation comme science qui nous paraît aussi problématique que son classement dans les technologies. À défaut d'un cadre plus approprié, cette nature des nanotechnologies, que nous pourrions qualifier d'hybride, à cheval entre la technologie et la science, pourrait-on dire, autorise à examiner la question tant sous l'angle de la philosophie des sciences que sous celui de la philosophie des technologies. Bien entendu, notre plus grande familiarité avec les philosophes des sciences a déterminé notre manière d'aborder la question qui, pour nous, revient à se demander si l'avènement des nanotechnologies ne relève pas de quelque impensé en philosophie des sciences. Cette remarque et ses conséquences attendues nous amènent à envisager, en dernière instance, la question de la caractérisation des nanotechnologies sous un angle analogue à celui qui consacra la remise en question du formalisme de la philosophie analytique initiée par Austin (1962). Cet angle d'attaque était le discours naturel pour des philosophes analytiques comme Strawson (1952) ou des pragmatistes comme Austin (1962 pour la 1<sup>ère</sup> éd. / 1970 pour la traduction française), le nôtre sera les nanotechnologies, ou plutôt les « nanotechnosciences », comme dynamique nouvelle de la science structurée comme un discours performatif au sens où Austin entend cette expression, c'est-à-dire à la fois discours et acte ou « discours-acte ». À l'instar des philosophes du discours ordinaire, notre objectif sera de tenter de reconnaître l'enchevêtrement entre science et technologie illustrée par les nanotechnologies après avoir confronté quelques-unes des épistémologies qui ont relativisé la vision éthérée de la science (mais pas assez, présumons-nous) qui fonda l'épistémologie normativiste de Karl Popper, par exemple. Ce choix de la confrontation participe d'une intention méthodologique de mise en exergue de la puissance explicative et des limites des philosophies des sciences de Kuhn, Lakatos, Robert et Hacking principalement. Il est en même temps une démarche qui doit nous amener à nous interroger sur la nécessité d'une certaine reconsidération de l'action ou, par analogie, du technologique et à sa prise en compte par les épistémologues dans l'appréhension

de cet événement nouveau que constituent ce que l'on nomme communément les nanotechnologies en tant que science ou technologie hybride.

Cependant, faut-il le préciser, notre démarche est bien différente de celle de Nano2e, que nous avons évoquée plus tôt, en ce que nous faisons le choix ici de nous limiter à un examen épistémologique basé sur les définitions des nanotechnologies sans viser spécifiquement les « pratiques matérielles détaillées » et sans l'arrimer à une réflexion éthique particulière. En outre, nous faisons le choix délibéré de renvoyer l'examen éthique approfondi à une étude ultérieure. Cette décision est liée au fait qu'au préalable nous avons estimé nécessaire une réflexion philosophique sur les nanotechnologies, en tant que science et technologie émergentes. C'est à notre sens la seule alternative pour y voir plus clair dans la cacophonie ambiante autour des nanotechnologies. Force est de constater que les travaux des sociologues des sciences n'ont pas suffi à la dissiper, même si ces derniers, à défaut de considérer notre entreprise comme totalement inutile et sans intérêt, pourraient soutenir que cela excède les prérogatives de la sociologie des sciences. Cela fait de la question de la définition des nanotechnologies et des nanosciences un problème épistémologique important : d'une part, compte tenu de la prolifération des définitions au gré des acteurs, des politiques et des enjeux, comme le montrent bien Céline Lafontaine (2010) et Dominique Vinck (2009) ; d'autre part, l'absence de définition consensuelle est à l'origine d'une confusion telle qu'aucune analyse philosophique de cette nouvelle dimension de la connaissance humaine ne saurait faire l'économie d'une définition rigoureuse des concepts de nanoscience et de nanotechnologie. Une telle initiative revêt un caractère normatif certain, mais sans aucunement prétendre dicter à la science une conduite quelconque. Dans cette perspective, notre problématique permettra de mieux circonscrire le champ de l'interrogation initiée à l'occasion de cet ouvrage.

Du coup, notre réflexion, après un chapitre I préliminaire qui traitera d'histoire, de précision conceptuelle et d'étymologie, se déploiera autour de trois questions



essentielles subsumées dans la question de l'existence ou non d'une philosophie des nanotechnologies :

### 1. Les nanotechnologies sont-elles une science ou une technologie ? (chap. 2)

Cette première question nous permettra de mettre en évidence l'idée que les nanotechnologies relativisent la distinction traditionnelle entre science et technologie, voire l'estompent.

Une fois la définition de notre objet établie, nous pourrions confronter notre conception des nanosciences et/ou des nanotechnologies aux analyses possibles de Thomas Kuhn à Ian Hacking, en passant par Imre Lakatos et Serge Robert. Rappelons que le but de notre démarche est, en plus d'explorer les pensées des auteurs que nous allons aborder, de soumettre ces différentes épistémologies à des tests de compatibilité vis-à-vis de ce que d'aucuns qualifient de nouveauté « révolutionnaire » dans l'histoire de la science contemporaine. Dans cette optique, nous aurons à interroger successivement les épistémologies de Kuhn, Lakatos et Robert puis celle de Hacking en gardant à l'esprit la possibilité qu'aucune des théories épistémologiques interpellées ne convienne aux nanotechnosciences. Autrement dit, la définition des nanos pourrait ne pas rentrer dans les cases de scientificité tel qu'entendu par les différentes doctrines de la philosophie des sciences.

Ainsi, ce cadre une fois posé, le chapitre 2 nous amènera à nous intéresser à la question de la définition des nanos afin d'apporter un éclairage suffisant sur ce dont parlent les spécialistes et les experts qui recourent aux termes nanotechnologie-s ou nanoscience-s. Ce chapitre sera constitué principalement de cinq points qui traiteront successivement de la miniaturisation opposée à la « monumentalisation », des différents types de définitions, du problème des enjeux, du caractère scientifico-technologique des nanos, puis de la définition que nous préconisons qui s'achèvera sur une mise au point conceptuelle qui finira de justifier la pertinence de notre préférence pour le concept de « nanotechnoscience ». La conclusion de ce

chapitre nous permettra de voir de façon plus précise de quoi l'on parle quand on évoque les nanosciences ou les nanotechnologies. Cette mise au point facilitera l'analyse critique subséquente qui s'y appuiera.

2. Laquelle des épistémologies de Kuhn, Lakatos, Robert ou Hacking conviendrait le mieux aux nanotechnosciences ? (chap. 3, 4 & 5). Les réponses à cette série de questions nous permettront de mettre en évidence l'évolution de la philosophie des sciences à travers la démystification de l'idée de pureté de la science. Celle-ci fut introduite par Kuhn puis poursuivie *mutatis mutandis* par Lakatos et Robert avant de connaître une forme de court apogée avec l'insistance de Ian Hacking sur l'importance de l'intervention (expérimentation) à côté de la représentation (théorisation). Ici nous avons choisi de commencer notre réflexion par l'un des premiers philosophes des sciences à avoir été pris au sérieux sur la dimension extralinguistique de la science, Thomas Kuhn. Y a-t-il eu changement de paradigme ou de programme de recherche avec l'entrée en jeu des nanotechnologies (on l'aura remarqué, nous disons plutôt des « nanotechnosciences » et nous verrons pourquoi) ? Et, quelle est la nature du nouveau paradigme ou programme de recherche ? Aussi, convient-il de se demander si, avec l'avènement des nanotechnologies, une nouvelle dynamique n'est pas insufflée à la science au point de la travestir ? Puis, nous la poursuivrons à travers les auteurs qui nous ont semblé avoir apporté une critique bonifiante sur la question. De cette façon, nous espérons arriver à trouver la théorie épistémologique qui sera la plus à même de répondre aux questions que posent les nanotechnosciences en tant que nouvelle discipline à la dimension scientifique atypique.

3. À défaut de l'existence d'une telle adéquation, quelles seraient les caractéristiques essentielles d'une épistémologie des nanos ? Dans notre conclusion, après avoir examiné le problème à l'aune de ces théories ouvertes à l'idée d'une science « impure » relancée par l'avènement des nanotechnologies, nous proposerons, alors, une autre approche qui s'inspirera à la fois de la

philosophie africaine, notamment la philosophie de l'orature de Mamoussé Diagne et de la révolution introduite dans la philosophie du langage d'Austin. L'identification par ce dernier d'une dimension « performative » dans le discours lui-même nous incite à penser qu'avec les nanotechnologies il y a, par quelque analogie aux « actes de discours », la mise en évidence d'une dimension « performative » de la science négligée dans la plupart des théories épistémologiques. À cet effet, les analyses praxéologiques de Denis Vernant sur la question nous seront d'une grande utilité.

Telles sont les questions que nous nous sommes posées et auxquelles nous tenterons de répondre tout au long de cette thèse dont elles constituent l'ossature. Afin d'y apporter un éclairage satisfaisant, nous avons opté pour un travail d'analyse comparative. Ce choix nous permettra d'exhiber certaines inconsistances épistémologiques afin de les écarter dans la perspective de notre projet ou de les remplacer par des propositions plus pertinentes.

Les orientations souvent différentes des études philosophiques existantes sur les nanotechnologies (thèse, articles et livres), notamment sur des aspects tels que le changement de paradigme et la scientificité rendent notre tâche plus difficile tout en lui conférant une certaine originalité dans l'exploration de la question. Ainsi, si nous n'arrivons pas à révéler parmi les théories visées une qui soit capable de prendre en charge les changements incarnés par les nanotechnologies, nous envisagerons alors de jeter les bases de ce qui pourrait être une nouvelle épistémologie de l'infiniment petit. Cela nous conduit à projeter une multitude d'hypothèses et à travailler, le cas échéant, à « donner aux nanosciences l'épistémologie qu'elles méritent », selon la célèbre formule que nous empruntons à Gaston Bachelard pour la circonstance.

Partant d'une définition hyperonymique de la technologie et d'une conception hyponymique, mais rigoureuse, des nanotechnologies telles qu'entendues actuellement dans la littérature, nous présumons que la mise à l'épreuve des



philosophies des sciences que nous avons décidé de tester à l'aune des nanotechnosciences permettra de montrer clairement que jusqu'ici les philosophes des sciences se sont contentés de sous-traiter la technologie ou de l'ignorer alors que ce qui importe, dans le contexte particulier des nanos, est de lui accorder une place similaire, voire équivalente, à celle de la théorie dans leurs doctrines épistémologiques.

La définition et l'examen du fonctionnement des nanotechnosciences devraient nous permettre d'avoir assez d'éléments pour tester dans un premier temps l'approche de Kuhn dont la conception des « paradigmes », bien que révolutionnaire, pourrait être inadéquate pour rendre compte d'une science qui se jouerait des paradigmes. Malgré son aptitude à expliquer les ruptures, nous savons bien qu'il n'y a pas chez Kuhn l'idée explicite d'un métaparadigme<sup>6</sup> capable de rendre compte de la tendance à la convergence paradigmatique annoncée. Celle-ci est rendue probable par la nature spécifique du « nano-objet », nouveau centre d'intérêt des disciplines scientifiques qui, dans leur configuration actuelle, représentent chacune un paradigme spécifique dans une optique kuhnienne. Cette rupture dans l'harmonie de la cohabitation et de la succession des paradigmes constitue en soi une révolution dans l'ordre des paradigmes qui troquent leur incommensurabilité contre une sorte de convergence. À ce titre, elle serait une révolution de la révolution de la « *structure des révolutions scientifiques* ». En fait, si les sciences se définissent par leurs objets respectifs, on peut parfaitement considérer que l'unité de paradigmes, naguère distincts les uns des autres, autour des nano-objets constitue un signe précurseur de l'avènement d'un super paradigme ou d'un « métaparadigme ». La particularité de ces derniers serait leur caractère « fusionneur » ou, à tout le moins, refondateur. Or, envisager une telle perspective,

---

<sup>6</sup> Voici les propos de Robert sur les critères d'évaluations comparatives des paradigmes : « Et pourtant, comme on l'a vu, Kuhn soutient que le progrès interparadigmatique est possible, qu'un paradigme peut éliminer les anomalies d'un autre et donc, implicitement, qu'il existe des critères métaparadigmatiques rationnels d'évaluation comparative des paradigmes. » Serge Robert, *Les Mécanismes de la découverte scientifique*, Presses de l'Université d'Ottawa, 1993, p. 180.

c'est sortir *ipso facto* du paradigme kuhnien qui, tout en admettant des critères de choix métaparadigmatiques entre deux paradigmes concurrents, n'envisage en aucun cas l'idée d'un métaparadigme.

Cependant, si les « nanotechnologies » conservent leur organisation disciplinaire actuelle, elles seraient comparables à une association circonstancielle de sciences diverses dans le but d'optimiser leurs recherches pour obtenir de meilleurs résultats plus rapidement. Autrement dit, elles seraient une organisation scientifique qui ne remettrait pas en cause l'intégrité structurelle et organisationnelle des différentes disciplines qui les composent, mais profiteraient de la diversité de leurs expertises respectives à des fins opératoires. Dans ce cas, l'avenir des nanos pourrait ne pas aller dans le sens de fusionner ses différentes composantes en une seule et même unité scientifique homogène. Il ne ferait que les conduire à s'intéresser aux mêmes objets et à partager leurs résultats au fur et à mesure de l'évolution de leurs recherches respectives. Du coup, la fusion ou subsumption paradigmatique de l'ensemble de ces domaines du savoir autour des nanos ne serait pas conforme à la doctrine kuhnienne. L'incommensurabilité des paradigmes, au sens strict, ne l'autoriserait pas.

Vue sous un autre angle, la pensée de Kuhn est compatible avec une activité scientifique affirmant l'autonomie imperturbable de la communauté scientifique qui se confond avec son paradigme de tutelle, pour ainsi dire, dans l'intérêt même du progrès de sa discipline. Cette conception de l'historien des sciences rencontre l'adhésion de la philosophe des sciences Isabelle Stengers selon qui il ressort que l'autonomie de la communauté scientifique est la condition du progrès. À son avis, elle est encore plus fondamentalement la condition de la science elle-même. Nous verrons qu'avec les « nanotechnologies » une telle thèse pourrait être mise en difficulté par la nouvelle direction technoscientifique adoptée.

Quant à la théorie lakatosienne, complétée ou bonifiée par la thèse robertienne, la perspective de son programme de recherche pourrait fort bien convenir au

développement des nanos qui semble se décliner sous la forme d'un grand programme de recherche ouvert à toutes les disciplines scientificotechnologiques ou presque. Mais, les critères de scientificité chez Lakatos risquent, eux aussi, de ne pas être compatibles avec une science ouverte dans un univers tel que celui des nanos. En effet, si l'on en croit Chalmers (2008, 1987 pour la première édition en français), il y a deux façons d'évaluer le mérite d'un programme de recherche chez Lakatos. La première est qu'il doit avoir un degré de cohérence lui permettant d'inclure la définition d'un programme pour la recherche future. La seconde est qu'il doit conduire à la découverte de nouveaux phénomènes. Ces deux conditions caractérisent la scientificité de tout programme de recherche digne de ce nom. Compte tenu de ce qui précède, autant dire qu'avec les « nanotechnologies », tout porte à croire que le second critère a de quoi être satisfait. Le premier, en revanche, requiert un examen plus attentif. En effet, même s'il peut paraître aisé de trouver une certaine cohérence entre une théorie et son application technologique, il n'en est pas de même quand on part des technologies avant d'envisager leurs implications scientifiques.

Puis, à la suite de la mise à l'épreuve de la théorie des programmes de recherche, nous interpellons Robert sur le même registre que Lakatos. Celui-ci, s'inscrivant dans la dynamique de son mentor Imre Lakatos, envisage une correction de son faillibilisme sophistiqué par l'introduction du concept de « correctionnisme » (Robert, 1993). Le philosophe québécois paraît ainsi avoir appris des failles et des insuffisances de ses prédécesseurs, Lakatos et Kuhn notamment, et propose, afin de les combler, une démarche dite « correctionniste ». Selon lui, le correctionnisme considère la science comme une fonction de correction par des modifications visant à éliminer les inconsistances horizontales ou verticales sur un système à triple niveau de langage : le descriptif, l'explicatif et le justificatif. Du fait de sa flexibilité et de sa plus grande ouverture, Robert pourrait être plus proche de la nouvelle dimension incarnée par le champ des nanotechnosciences où les choses évoluent tellement vite et de façon tellement atypique qu'une distinction *a priori* entre nanosciences et nanotechnologies serait assez complexe, voire désespérée. Cet état

de fait est lié, outre la nature de l'objet nanométrique, à la difficulté de la manipulation moléculaire qui réserve beaucoup de surprises aux chercheurs. Les résultats de leurs recherches peuvent déboucher autant sur une découverte à caractère théorique que technologique. Ainsi, Robert n'échappe pas à la question du sens épistémologique à donner aux nanotechnologies. D'où l'intérêt que nous porterons à son holisme à double entrée que nous questionnerons dans le même sillage que Lakatos. Le modèle robertien, critique de son prédécesseur, est présenté comme un « holisme interactif » dans lequel le système total de la connaissance comporte trois niveaux discursifs susceptibles de nous permettre de comprendre le fait qu'une modification de l'ordre inférieur (descriptif) ou de l'ordre supérieur (explicatif ou justificatif) peut transformer les relations entre deux ordres voisins. Ce système peut être modifié par deux entrées : l'une « inductive ascendante » avec un impact sur le contenu de la connaissance ; l'autre « déductive descendante » disposant de la propriété de modifier la structure du système (Robert, 1993, 119-120). La possibilité de la modification par la première entrée permet d'envisager la possibilité d'une philosophie des nanos construite autour de l'apport technologique.

À la suite de cet examen, nous entamerons une dernière tentative de conciliation, sur un registre relativement différent, de celui des épistémologies incarnées par les philosophes précédents. Ainsi, nous ferons intervenir Ian Hacking en dernière instance, notamment pour sa critique de la conception représentationnaliste de la science. En effet, selon le point de vue du philosophe canadien, si l'on admet que la science a deux buts : la théorie et l'expérimentation, on peut convenir que les théories disent comment est le monde et que l'expérimentation et la technologie subséquente changent le monde. De ce fait, selon lui, l'essentiel de l'actuel débat autour du réalisme scientifique est mené en termes de théorie, de représentation et de vérité, ce qui l'amène à penser qu'il ne saurait y avoir d'argumentaire définitif pour ou contre le réalisme sur le plan de la représentation. Il en déduit alors que si nous passons de la représentation à l'intervention, l'antiréalisme a moins de prise. Du coup, pour lui, l'arbitre final en philosophie n'est pas comment nous pensons, mais ce que nous faisons (Hacking, 1983, p. 31). Force est de constater que



l'orientation que Hacking donne ici au débat est très intéressante pour notre réflexion. Cependant, nous concéderons à Gilbert Hottois (2004a) le fait que les hésitations de Hacking à passer d'une philosophie de la représentation (et de la raison) à une philosophie de l'action (et de la volonté) qui inclurait l'action technoscientifique individuelle et collective (Hottois, 2004a, p. 76) l'empêchent de franchir le pas. Aussi, comptons-nous aller plus loin en suggérant la piste d'une analyse analogique de la conception austinienne (Austin, 1970 – 1<sup>ère</sup> édition 1962) du « discours performatif » à des fins heuristiques.

Ainsi, compte tenu de la forte éventualité que les « nanotechnologies » ne soient pas seulement une science nouvelle, mais bien plus que cela, elles pourraient être une nouvelle manière de faire de la science. Daston et Galison (2012, p. 472) parlent même « de la création d'un nouveau soi scientifique », ou encore d'« une figure hybride, qui cherche très souvent à atteindre des objectifs scientifiques, mais dans une démarche qui emprunte beaucoup à l'ingénierie, aux applications industrielles et même à des ambitions artistico-esthétiques. » (Daston et Galison, 2012, p. 472). À ce titre, il n'est pas superflu, à défaut d'en établir la scientificité, d'en déterminer la nature. Rien d'étonnant que la perspicacité des philosophes des sciences puisse être mise à mal par la trajectoire déconcertante prise par ce que l'on appelle communément « les nanotechnologies » dont les développements constitueront un tournant capital pour l'avenir de nos savoirs et de nos savoir-faire. Et ce, à un tel point qu'il faudrait peut-être envisager de faire de la philosophie des sciences autrement, en donnant une place plus importante aux rôles de la technologie dans nos théories philosophiques sur la science. C'est cette perspective qui justifie notre recours à la théorie austinienne des actes de discours qui semble partager un certain nombre de caractéristiques avec la question qui nous occupe. Ainsi, si la science ne peut plus se résumer à ce que Hottois (2004a) désigne sous le nom de « logothéorie », elle pourrait bien avoir pris résolument une toute nouvelle dimension qui rend l'idée d'une science indissociable de la technologie à laquelle elle serait intrinsèquement liée. Un tel tournant de l'activité scientifique ne saurait faire l'économie de l'analogie avec « *How to do things with Words?* » de Austin

(1962). Ce qui justifierait davantage notre choix de recourir au concept « nanotechnoscience » plutôt que « nanotechnologie ».

À ce titre, étant donné la tournure que prendra notre analyse avec Hacking (1983), Schmidt (2011) et Kastenhofer (2011), notamment, nous comptons provoquer une rencontre heuristique entre philosophie des sciences et philosophie des technologies dans une optique austinienne. Celle-ci envisagerait les nanotechnologies comme un « discours ordinaire », à l'instar des « performatifs », à la fois discours et action ou plutôt discours-acte, à la fois science et technologie voire science-technologie. Autrement dit, à l'instar du concept d'acte de discours introduit par Austin (1962/1970), la science ne serait-elle pas en train de prendre une tournure résolument « performative », voire interventionniste, avec l'avènement des nanotechnologies ? C'est la piste que nous nous proposons d'explorer en dernière instance afin d'apporter une solution possible aux questions que pose l'intrusion des nanotechnosciences dans l'univers de nos savoirs en indiquant une nouvelle direction pour une épistémologie de l'infiniment petit ou une « nanophilosophie ».

Nos demandes auprès de *STMicroelectronics* Grenoble ayant été ignorées par les responsables de cette structure qui n'ont pas répondu à nos sollicitations notre présent travail ne porte pas sur les pratiques que nous aurions pu observer nous-mêmes, mais sur les discours émanant parfois des acteurs eux-mêmes, d'autres fois des observateurs scientifiques ou ingénieurs avertis. Minattec, le temple des nanotechnologies en France, est resté assez hermétique même si nous avons pu assister à une rencontre sous haute surveillance sur les nanos qui s'est tenue dans ses murs lors de la 9th *Leti Annual Review* qui a eu lieu à Grenoble, les 18 et 19 juin 2007. En outre, nous avons été informés à la dernière minute de l'annulation de la visite des salles blanches prévue à cette occasion. Pour toutes ces raisons, le questionnaire que nous avons conçu pour notre projet d'enquête a été abandonné et nous avons dû changer notre fusil d'épaule en optant pour des investigations basées exclusivement sur l'analyse des discours, des ouvrages, des articles ainsi que des documentaires sur les pratiques en salle blanche et sur les débats autant sur les nanos

qu'autour d'elles. Cependant, d'autres spécialistes ayant pu se faire ouvrir les portes qui se sont fermées devant nous, nous avons pu tirer profit de leurs études afin de bonifier la nôtre, ce qui nous a permis de contourner une partie des obstacles qui ont été dressés sur notre chemin dès le début de nos recherches et qui ont jalonné leur déroulement.

Il faut dire que l'étude philosophique d'une activité nanotechnoscientifique en pleine effervescence comporte un certain nombre de contraintes qui ne manqueront pas de déterminer le cours de nos recherches et d'en affecter les résultats. Ainsi, dans le cas des nanotechnosciences, il resterait à démontrer, par exemple, que la juxtaposition de toutes les disciplines scientifiques et non scientifiques (Ingénierie, technologies de l'information, etc.) réunies autour d'un même projet produit encore de la science. Ou alors, quelle science ? Il nous paraît important de garder à l'esprit la remarque de Marc J. de Vries<sup>7</sup> (2006, p. 178) qui conclut son chapitre sur la complexité de la nanotechnologie (« chap. 8 : *Analyzing the Complexity of Nanotechnology* », in Baird et Schummer, 2006) en notant combien une description non-réductionniste des nanotechnologies peut être complexe. Selon lui, un tel examen (non-réductionniste) soulève plus de questions qu'il n'apporte de réponses. Il concède, cependant, la possibilité qu'à ce stade de développement des nanos, l'identification des questions philosophiques pertinentes soit plus importante que de tenter de fournir des réponses aux questions posées (de Vries, 2006, p. 178). Cette complexité liée à la nature même de la question qui nous occupe ici traversera de part en part cette présente réflexion sans la dissuader ni l'affaiblir. En tout cas, nous l'espérons.

---

<sup>7</sup> De Vries soutient ce qui suit avant de tirer la conclusion que nous évoquons ici : « Other worry about economic aspects of nanotechnology and in particular industrial companies are confronted with the difficult question if, and if so, how to invest in this still uncertain new type of technology. In other words: already now it is clear that the development of nanoscience and nanotechnology is a matter of great complexity, in which many different factors and issues are involved. » De Vries. 2006. chap. 8 : *Analyzing the Complexity of Nanotechnology* », p. 166, in Baird et Schummer, 2006. *Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society*, World Scientific Publishing, Singapore.



Il est aussi important de noter que la nature de ces limites tient à celles de notre objet d'étude. D'une part, les nanotechnosciences sont une activité humaine nouvelle en cours de formation et de conceptualisation, donc insuffisamment conceptualisée. Elles n'ont pas encore atteint leur maturité ni du point de vue de l'organisation, ni du point de vue du fonctionnement, il ne serait pas inexact de dire qu'elles se cherchent encore. De ce fait, dans leur forme actuelle elles ne constituent pas un ensemble homogène puisque selon les laboratoires et les choix organisationnels de leurs responsables, des divisions sont encore maintenues entre des disciplines scientifiques qui continuent de rester parallèles. Or, la nature de l'objet de leurs recherches devrait les amener à tisser des liens plus étroits afin de travailler ensemble conformément à la spécificité exigeante de leur objet. Le *diktat* du nano-objet qui fixe les règles serait susceptible de dissuader les différents acteurs de s'y intéresser en ordre dispersé, chacun dans sa tour d'ivoire.

Il existe tout de même des laboratoires qui tentent de remédier à cette situation afin d'optimiser leurs recherches. On peut dire que dans l'état actuel de leur évolution, les nanotechnosciences sont un composé de sciences et de technologies en pleine construction. Elles traversent une sorte de phase transitoire qui devrait mener, si ce n'est déjà fait, à l'aboutissement d'une discipline hybride plus mature et mieux organisée. Quoique cet état d'incomplétude actuelle constitue une limite imposée à notre analyse par la nature de notre sujet.

D'autre part, beaucoup d'aspects liés directement aux problèmes que posent les nanotechnologies aux observateurs avertis ne seront pas traités ici ou ne le seront que de façon partielle. En effet, la question de l'acceptabilité revient souvent dans les débats publics sur les nanos autant que celle de leur utilité, voire de leur « ustensilité ». En outre, toutes les interrogations sociétales, éthiques légitimes et incontournables, seront, en quelque sorte, les parents pauvres de cette étude. Il est clair que parler des nanos sans s'appesantir sur les multiples questions soulevées par les immenses possibilités que nous offre notre capacité nouvelle à manipuler la matière à l'échelle moléculaire, voire atomique, peut paraître complètement



surréaliste. Cela explique pourquoi d'autres chercheurs en sciences humaines, des philosophes et des sociologues notamment, n'ont pas attendu l'élucidation complète du concept de nanotechnologie pour se lancer dans les réflexions urgentes sur ces dimensions intrinsèques au développement de ce que l'on n'hésite plus à classer dans la catégorie des « technosciences ». Il faut dire que les exigences de notre problématique et le temps dont nous disposons pour boucler cette exploration de la question ne nous permettent pas d'aborder toutes ces innervations de notre problématique dont la légitimité ne fait pas l'ombre d'un doute.

Par ailleurs, la définition que nous proposons ici tient bien compte de l'état actuel de l'évolution de technologies comme le microscope à effet tunnel qui nous permet d'appréhender les objets nanométriques. Il est donc possible que la création d'un nouvel instrument qui fonctionnerait différemment mette en question la pertinence de notre critère d'observation sans affecter toutefois le principe de manipulabilité qui demeure une condition nécessaire à l'activité nanotechnoscientifique. Cette remarque sur les difficultés intrinsèques à une recherche comme la nôtre en appelle une autre. En choisissant de travailler sur un sujet tel que celui-ci, nous sommes confrontés à un dilemme semblable à celui qui a habité Parménide et Héraclite. Les nanotechnosciences progressent à une vitesse vertigineuse ainsi que les savoirs qui l'accompagnent et permettent de l'analyser. De ce point de vue, ce travail sera un exercice qui consistera à faire, en quelque sorte, la science de ce qui est en mouvement sans pouvoir la figer vraiment. Ainsi essayons-nous d'échapper à ce que préconisait Parménide, qui nous aurait condamnés à l'immobilisme intellectuel duquel nous tentons de nous affranchir, tout comme nous évitons l'aporie à laquelle nous conduirait le monde évanescent d'Héraclite. Alors faut-il constater qu'elles existent et ne pas se risquer d'en parler ou devrions-nous renoncer à les saisir à cause de leur évanescence ? À une telle question, l'initiative de cette thèse s'impose en réponse négative sans aucune ambiguïté.

De plus, les questions relatives à la place de la fiction et de l'imaginaire (Crichton, 2002 ; Drexler, 1986) ainsi que leur rôle dans la constitution et le développement

des « nanotechnologies » n'auront pas la place qu'elles méritent dans notre analyse. Cependant, nous ne saurions les ignorer totalement, compte tenu de leur rôle dans l'aventure technoscientifique qu'est la nôtre. Une autre dimension qui mériterait une analyse plus approfondie est la substitution progressive de la logique des brevets à la tradition des publications scientifiques. Les conséquences de ce phénomène sur l'organisation et le développement de la recherche ne feront pas l'objet d'une analyse systématique dans notre présent développement, mais nous convenons qu'elles mériteraient plus d'attention.

*Last but not least*, comme nous l'avons déjà laissé entendre, nous n'avons pas trouvé de textes allant dans le sens d'une analyse paradigmatique des nanotechnologies. Cependant, un certain nombre d'ouvrages, de thèses telles que celle de Sacha Loeve (2009) et d'articles que nous avons évoqués précédemment nous ont été très utiles pour la construction de notre problématique et l'approfondissement de certains aspects de nos investigations. Ce travail n'en est pas moins passionnant et se pose comme une des premières tentatives qui abordent les questions sur la nature épistémique des nanotechnologies et auxquelles nous essaierons d'apporter la réponse du pionnier avec les difficultés qui lui sont inhérentes. Une telle réalisation nécessite quelques précautions tant du point de vue du fond que de celui de la forme. Convaincus qu'une bonne structure méthodologique peut permettre d'organiser et de faciliter l'intelligibilité des idées et des arguments que nous comptons développer, nous avons élaboré la nôtre en gardant bien à l'esprit cette exigence de rigueur en ligne de mire.

Le travail de définition constitue une part importante de cette thèse puisqu'il sera la base de l'analyse philosophique à laquelle nous allons nous livrer. Notre définition se focalisera tout d'abord sur les fondements historiques identifiables de l'avènement des « nanotechnologies ». Puis, elle reconsidérera les discours des acteurs souvent arrimés aux discours institutionnels dont ils constituent des relais privilégiés. Les ethnologues et sociologues des sciences, Dominique Vinck (2009) et Céline Lafontaine (2010), notamment, ont trouvé les points de vue des

chercheurs, qu'ils ont côtoyés et interviewés, divers et variés, voire divergents, par moment. Aussi, insisterons-nous, hors des sentiers battus de l'ethnologie et de la sociologie des sciences, sur le contexte d'émergence des « nanotechnologies ». Ici, nous pensons à l'invention déterminante du microscope à effet tunnel par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer en 1981 (à Rüschlikon, Zürich). En plus de cet événement majeur pour l'exploration de la matière à l'échelle nanométrique, cette nouvelle dimension qui s'ouvre à notre univers scientificotechnologique nous réserve bien d'autres surprises. Il s'agit des effets d'échelle propres au niveau nanométrique qui voient les propriétés de la matière s'optimiser et relever ainsi des lois de la physique quantique, ou plus précisément de la nanophysique. Les nanotechnologies échappent alors aux préceptes du déterminisme macrophysique habituel qui caractérisent généralement la science. Du coup, outre l'omniprésence de la technologie au sens large dans l'univers nanométrique, le changement de propriétés devient un paramètre important de la définition des nanotechnologies que nous comptons proposer dans ce travail. Compte tenu du fait que les conditions de la naissance d'un individu ne sont pas fortuites dans son histoire, nous présumons qu'elles ne le sont pas non plus dans celle d'une discipline scientifique. Dans cette perspective, recourir à l'analyse de l'histoire contemporaine de la naissance des nanotechnosciences pourrait nous aider à mieux en rendre compte.

Ainsi, nos tests consisteront en analyses comparées de ces discours épistémologiques, dont la technologie est partie intégrante, que nous confronterons à la conception de la nanotechnoscience à laquelle nous sommes arrivés au terme de notre second chapitre. Nous recourons aussi, en nous servant du logiciel *Adobe Acrobat 8 Professional*, à une analyse lexicométrique basée sur les morphèmes relevant de la science que nous confrontons à ceux propres à la technologie, même si la précision du décompte des occurrences de certains termes peut être parfois affectée par la piètre qualité de la numérisation des textes sources. Nous comptons ainsi mettre à jour les points d'ancrage qui existent entre les conceptions de la science de nos auteurs et la description des nanos que nous préconisons. Ensuite, nous nous interrogerons sur leur capacité à prendre en compte les

nanotechnosciences dans leur système par une sorte de relation d'hyperonymie. Notre propos devrait nous amener progressivement à répondre à cette question globale à la simplicité trompeuse : « Y a-t-il une philosophie de la science qui convienne aux nanotechnosciences ? » le but ultime de l'exercice étant de démontrer qu'en l'absence d'une théorie épistémologique qui convienne parfaitement aux nanotechnosciences, il faudrait en créer une dotée d'une force d'explication acceptable.

Le premier chapitre de ce travail est une mise en question de l'attribution un peu rapide du titre de précurseur à Richard Feynman. Nous y exposerons tour à tour ce que certains auteurs ont précipitamment considéré comme des manifestations prématurées des nanotechnologies et les intuitions de personnages historiques qualifiées de « nanotechnologiques » avant l'heure par certains (Drexler, 1986 ; de Kerorguen, 2006). Ainsi nous ferons état d'idées pas toujours crédibles, de « rêves » et de prédictions parfois présentés comme prophétiques et annonciateurs de l'avènement de ce qui prendra plus tard le nom de « nanotechnologies ». Enfin, nous examinerons des données plus récentes et en relation plus directe avec la naissance des nanotechnologies. Cette discussion préalable du cadre historique et référentiel à la fois du préfixe « *nano* » et du concept de nanotechnologie nous conduira progressivement au vif du sujet.

Notre cadre définitionnel une fois posé, nous serons en mesure d'examiner successivement les relations possibles entre les épistémologies de Kuhn, Lakatos, Robert et Hacking face aux nanotechnosciences. Les chapitres 3, 4 et 5 seront successivement consacrés à l'examen de leurs succès et de leurs limites face à une science qui assume désormais pleinement sa « technicité ». La similarité formelle de ces trois chapitres nous autorise à les décrire ensemble puisqu'ils sont constitués de trois ou quatre sous-chapitres censés remplir la même fonction. Ainsi, alors que le premier point présente en général les aspects pertinents de la théorie à examiner, le second essaye d'éclairer les nanotechnologies à l'aune de la théorie



visée, puis le troisième en examine les limites avant que nous ne bouclions notre examen en tirant les conséquences qui s'imposent.

On peut dire que c'est à partir de Kuhn que l'attention accordée à la place de la technologie dans les sciences commence à se développer. Néanmoins, ce dernier demeure attaché à la science « pure » et s'est intéressé surtout aux révolutions scientifiques majeures (Hottois 2004a, p. 106). Cependant, la brèche qu'il a ainsi ouverte ne tarda pas à attirer l'attention d'un des plus brillants disciples de Popper qui, contre les enseignements de son maître, accorde une place particulière aux hypothèses de Kuhn au cœur de son falsificationnisme sophistiqué. Aussi, à travers son idée de caractère quasi empirique des preuves mathématiques, Lakatos avait initié sa propre démarcation du dualisme oppositionnel entre le construit théorique et le donné empirique soutenu par les empiristes logiques et Popper. Cette tendance à la prise en compte de la dimension extralinguistique dans la conception des théories épistémologiques va se perpétuer après Kuhn et Lakatos. Serge Robert qui s'inscrit dans la même tradition que celle du falsificationnisme sophistiqué soumet celui-ci à une correction qu'il a jugée indispensable afin de « naturaliser davantage la normativité » lakatosienne. Ainsi, selon lui, sa thèse correctionniste « s'inscrit dans une perspective qui reconnaît comme Lakatos la nécessité d'appliquer une normativité pour connaître, mais qui considère chaque norme comme un fruit précaire de l'évolution et non comme un *a priori* non modifiable, comme un produit de notre capacité neuronale d'adaptation, capacité autorisée par la plasticité neuronale dont notre cerveau a hérité dans l'histoire de la vie. » (Robert, 2009) Cependant, malgré la prise de conscience de la nécessité de redonner à la nature sa place dans la philosophie des sciences, Hacking remarquera la dichotomie instaurée entre science et technique alors même que l'expérimentation demeure un baromètre quasi incontournable de toute scientificité. C'est cette négligence de l'expérimentation que le professeur du Collège de France essaye de conjurer dans *Representing and Intervening* (1983). La timidité de ses conclusions, telle que soulignée par Gilbert Hottois (2004a), porte à croire que l'évocation de la dimension expérimentale de la science par Hacking a servi principalement son

réalisme plutôt qu'à la construction d'une philosophie technoscientifique, comme on aurait pu l'espérer. À l'issue de cet examen succinct, toujours habité par le souci de trouver un cadre épistémologique adéquat et susceptible de proposer de meilleures réponses au caractère particulier des nanotechnologies, nous envisagerons alors une solution inspirée par la philosophie du discours ordinaire tel qu'imaginé par Austin. Alors que ce dernier considérait que la fonction principale du langage est de faire des choses, d'agir, nous pensons que l'avènement des nanotechnosciences a mis en exergue le fait que l'activité scientifique à l'échelle de l'infiniment petit n'est pas seulement une entreprise de représentation, mais aussi, et surtout une activité d'intervention. À l'instar d'Austin qui reprend les empiristes logiques à cause du fait qu'ils omettent la plupart des déclinaisons du langage, par une analogie de proportionnalité nous reprenons ces philosophies des sciences qui considèrent que leur représentation du monde suffit à expliquer et à prédire les événements. À ce titre, nous espérons réaliser auprès du représentationnalisme ce qu'Austin a réussi face à l'empirisme logique avec une visée heuristique susceptible de faciliter la construction d'une philosophie digne des nanotechnosciences.

L'issue de cette analyse pourrait servir la cause de la science tout comme elle pourrait s'adresser à la technologie. Ce sera l'occasion de faire la synthèse des problèmes qui limitent la portée de la philosophie des sciences dès qu'il s'agit des nanotechnologies (nanotechnoscience) afin d'envisager sérieusement les conditions de possibilité d'une « nanophilosophie ». Cette partie de notre analyse sera donc l'occasion de poser les bases de ce qu'une philosophie des nanosciences ne saurait manquer de prendre en considération afin de contribuer ainsi à donner une philosophie aux « nanotechnosciences » en devenir.

Dans cette optique, il ne serait pas fortuit de donner une place plus centrale à la technologie dans l'analyse philosophique de la science, et ce, d'autant plus que l'une des caractéristiques innovantes des nanotechnosciences, c'est l'omniprésence des ingénieurs en plus des biologistes et des informaticiens. À ce propos William Sims Bainbridge et Roco (2007) de la *National Science Foundation (NSF)* donnent

bien le ton du caractère inédit de la tournure donnée à la science par les nouveaux moyens introduits par les nanotechnologies. Il y a, en plus, la nouvelle impulsion impliquant un renouvellement total des instruments, des méthodologies et des paradigmes scientifiques. Elle indique aux sciences et aux technologies la voie vers la convergence qui permet un contrôle total du processus de découverte et de conception qui mène du bas vers le haut, du nano au macro (Roco et Bainbridge, 2007). On pourrait dire que c'est le début de la monumentalisation en marche !

Sachant qu'au-delà des nanotechnologies actuelles d'autres niveaux de l'infiniment petit restent encore à explorer (on parle déjà de picotechnologies ( $10^{-12}\text{m}$ ) et de théorie des cordes (environ  $10^{-33}\text{m}$ ), nous ne voyons pas comment la philosophie des sciences actuelle pourrait échapper à sa propre exigence de questionnement au vu des nouvelles dimensions que prennent à la fois nos savoirs et nos savoir-faire. À la vitesse où les changements se produisent dans le champ scientifico-technologique actuel, adopter l'attitude hégélienne, qui consistait pour la philosophie à faire comme la chouette de Minerve et à attendre le crépuscule pour prendre son envol, n'est tout simplement plus envisageable. Cette remarque justifie la reformulation de notre interrogation sur la pertinence d'une révolution, non pas de la science, mais dans la philosophie des sciences, à l'occasion de nos conclusions. Une telle idée est inspirée par les bouleversements dans les technologies de l'infiniment petit qui n'épargnent ni la science ni les disciplines qui se la donnent comme objet de réflexion ou d'étude. C'est en réponse à cette situation inédite dans l'histoire des sciences qu'intervient la question de l'invention d'une philosophie des sciences de rupture, voire d'une « nanophilosophie » capable d'assumer les nouvelles questions que posent nos progrès technoscientifiques les plus récents. La portée de celle-ci dépasserait tout ce que nous avons connu jusque-là. Aussi, à défaut de se réinventer, la philosophie des sciences doit, au moins, faire siennes les interrogations philosophiques propres à l'exploration de l'infiniment petit dont les microtechnologies ont certes ouvert la voie, mais dont les nanotechnologies sont devenues à la fois les catalyseurs et les réinventeurs.

## CHAPITRE I

### DE L'ORIGINE DES NANOS : DU RÊVE À LA RÉALITÉ

La question de l'origine des nanos posée ici n'est pas une question fortuite dans la construction de notre argumentaire. En effet, cette question récurrente dans la littérature très prolifique sur les nanosciences et les nanotechnologies est incontournable dans la perspective d'un examen approfondi du sujet. Un certain nombre des auteurs que nous avons lus évoquent explicitement une étymologie grecque pour parler de la provenance du concept « nano- » (Bensaude-Vincent, 2009 ; Béland et Paténaude (sous la direction de), 2009) et attribuent une paternité états-unienne à l'origine de cette activité à cheval sur la technologie et la science.

Au-delà de ce qui pourrait paraître une simple querelle de puristes, l'objectif de ce présent chapitre est, surtout, de présenter les débats en cours dans la communauté des experts, en gardant à l'esprit l'idée que les définitions qui nous préoccuperont au prochain chapitre en seront affectées d'une certaine manière du fait que certains présupposés sont importants dans la perspective de la délimitation conceptuelle du champ des nanos. Ainsi, nous montrerons que l'origine des concepts « nanotechnologie » et « nanoscience » n'est pas grecque, mais plutôt latine pour des raisons que nous détaillerons ci-dessous. Notre second point consistera à démontrer que la paternité des nanotechnologies, attribuée à Richard Feynman par Eric Drexler (1986), et bien d'autres après lui, n'est pas exempte de difficultés que certains auteurs comme Christian Joachim et Laurence Plévert (2008) n'ont pas manqué de souligner. En effet, si la raison principale de la paternité supposée de Feynman est la primauté de son propos sur la possibilité d'agir à l'échelle nano, nous verrons que cette caractéristique n'est pas propre au prix Nobel de physique (1965). Avant lui, Napoléon et même plusieurs siècles auparavant, Démocrite et



bien d'autres ont imaginé, voire envisagé, la possibilité de l'intervention technique à l'échelle lilliputienne. Puis, nous examinerons la portée de la « Loi de Moore » dans ce processus ainsi que l'impact de l'avènement des instruments d'« observation » appropriés à l'échelle nanométrique. Enfin, nous terminerons cette brève incursion dans le passé par une revue des pratiques technologiques, qualifiées de nanotechnologiques par certains, de l'Antiquité à l'époque contemporaine, en passant par le Moyen Âge. Nous verrons que ces savoir-faire ont pu prêter à confusion dans l'optique d'une définition rigoureuse, si elles n'ont pas servi malgré elles à entretenir l'idée que les nanotechnologies sont aussi vieilles que la recherche de la pierre philosophale.

Ce prélude à la question de l'origine en introduit une autre, celle de la définition du concept de nanotechnologie qui, à peine popularisé par Drexler, a donné lieu à une cacophonie définitionnelle assez surprenante et sans précédent dans l'histoire des sciences et techniques. Nous essaierons de saisir les raisons d'une telle prolixité dans notre 2<sup>e</sup> chapitre, mais pour l'instant voyons ce que la recherche de l'étymologie du concept « nanotechnologie » nous réserve.

### 1.1. L'étymologie en question

Dans le débat autour de la définition des nanotechnologies, l'élucidation de la question de l'étymologie est très importante puisqu'elle permet de mieux comprendre les nuances qui caractérisent les différents usages du préfixe « nano ».

Afin de lever une équivoque qui pourrait être lourde de conséquences sur notre quête de rigueur définitionnelle, nous nous proposons de confronter les deux principales thèses sur l'origine sémantique du morphème « nano ». En effet, dès qu'il s'agit de morphologie du concept de nanoscience ou de nanotechnologie, deux

thèses s'affrontent. La première soutient que l'origine des nanos est grecque, alors que la seconde prétend que cette étymologie n'est autre que latine.

Ainsi, nous nous proposons de faire, ici, la lumière sur ce quiproquo en deux temps. Dans notre première présentation, nous fournirons des extraits de textes de quelques spécialistes des nanotechnologies qui considèrent que nous devons aux Grecs la formation de ce nouveau concept qui désigne notre nouvelle capacité à accéder à l'infiniment petit. Puis, nous apporterons les arguments favorables à l'adoption de l'origine latine comme la seule conforme à l'histoire du préfixe en question.

#### 1.1.1. Les tenants de l'origine grecque du préfixe nano

La question de l'étymologie est une préoccupation presque exclusivement francophone, avec quelques exceptions dans la littérature anglophone, comme Mark et Daniel Ratner (2003) que nous citons plus bas. En effet, dans la plupart des textes portant sur les nanotechnologies rédigés en langue anglaise, l'histoire de la formation du concept n'est presque jamais abordée. C'est à croire que ce réflexe méthodologique est un trait de caractère de la littérature scientifique en langue française.

Cependant, quelle que soit la langue d'expression des auteurs qui traitent de l'étymologie, l'attribution aux Grecs de l'origine de la première unité de sens (« nano ») dans les concepts de « nanoscience » ou de « nanotechnologie » est la plus courante. Mais, nous verrons que ce que l'on peut qualifier de méprise dans la généalogie du concept peut avoir des conséquences sur la définition sans nécessairement la compromettre. En effet, savoir que le préfixe « *nanno* » avec deux « n » existait bien avant l'euphorie qui a accompagné les « nanos » avec une consonne non doublée peut aider à comprendre et expliquer la nature particulière de l'innovation qui a rendu possible l'engouement suscité par les « *nano-* » actuels et non par les « *nanno-* » du début du XX<sup>e</sup> siècle. Nous reviendrons plus en détail sur cet aspect du problème, mais commençons par déployer un certain nombre

d'extraits de textes faisant mention de l'origine grecque du morphème qui nous intéresse.

Si nous prenons l'exemple de Mark et Daniel Ratner, dans le premier chapitre de leur ouvrage, *Les nanotechnologies : la révolution de demain*, le préfixe « nano » (issu du grec *nanos*, « nain, petit ») signifie un milliardième ( $10^{-9}$ ). Un *nanomètre* (qu'on écrit 1 nm) est donc un milliardième de mètre, ou encore un millionième de millimètre<sup>8</sup>. » Pour eux, donc, l'origine grecque de la particule sémantique nano ne fait l'objet d'aucun doute et d'aucune discussion préalable. Pour eux, la paternité hellène est presque une évidence, elle va de soi.

C'est ce même type de certitude qui habite Roger Moret, qui, s'interrogeant sur ce que désignent les termes nouveaux « nanosciences » et « nanotechnologies », dans l'avant-propos de son ouvrage de vulgarisation, *Nanomonde : des nanosciences aux nanotechnologies*, formule la question suivante : « Pourquoi le préfixe nano (d'origine grecque signifiant « très petit ») devient-il à la mode, associé à des termes très variés pour former nano-objets, nanomatériaux, nanosystèmes, ou encore nanodéfis, nanoenjeux et même nanomonde ? » (Moret, 2006, p. 5). Ici aussi Moret considère comme acquise la source étymologique des concepts qu'il tente d'expliquer.

Dans ce même ordre d'idées, Bernadette Bensaude-Vincent affirme en passant que l'origine du préfixe « nano » est grecque. Dès le premier paragraphe de l'introduction de son ouvrage *Les vertiges de la technoscience*, elle formule sa question en ces termes : « Par quel miracle ce préfixe « nano » – qui provient d'un terme grec signifiant « nain » – peut-il détenir le pouvoir d'attirer des milliards de dollars ? » (Bensaude-Vincent, 2009, p. 5). Elle laisse donc clairement entendre que nous devons aux grecs le premier élément du terme « nanotechnologie ». Aucune

---

<sup>8</sup> Mark & Daniel Ratner, 2003. *Nanotechnologies : la révolution de demain*, éd. Campus Press, « Chap. 1 : Introduction au monde des nanotechnologies », p. 7, Traduction française par Nathalie Audard et Erick Seinandre, 2003. (*Nanotechnology: A Gentle introduction to the Next Big Idea*, pour la version anglaise, Pearson Education, Inc.).

allusion n'est faite à une confusion possible avec un autre préfixe de même type et de même origine qui a fait son entrée en histoire des sciences depuis 1909 grâce à Hans Lohman<sup>9</sup>.

Jonathan Genest et Jacques Beauvais, quant à eux, attribuent au grec la paternité de ce morphème devenu l'emblème des nouvelles sciences et technologies du vingt-et-unième siècle. En effet, ils soutiennent ce qui suit dans le chapitre qu'ils ont consacré à la définition des concepts de « nanosciences » et de « nanotechnologies » :

La principale caractéristique commune à l'utilisation, parfois exagérée de ce terme vient du fait qu'on traite d'objets extrêmement petits. Le préfixe « nano », qui tire ses racines du grec et se traduit par « nain » est aujourd'hui utilisé dans le langage scientifique pour indiquer la dimension d'un milliardième d'une quantité donnée : un nanomètre (nm) correspond à un milliardième de mètre, un nanogramme (ng), à un milliardième de gramme et ainsi de suite. (Genest et Beauvais, 2009, p. 7-36).

Cette référence au grec pour fonder l'origine du préfixe « nano » n'est pas fortuite. Elle trouve son explication dans les péripéties de cette particule sémantique dont la formation ne s'est pas vraiment faite sur un long fleuve tranquille. Nous verrons qu'un certain nombre de circonstances historiques ont contribué à brouiller la piste de l'origine grecque en ce qui concerne l'univers « *nano* » (latin), plutôt que « *nannô* » (grec), tel qu'il s'est imposé à la communauté scientifique. Notre intention est de démontrer que le préfixe « nano » ne saurait, en toute rigueur, être grec, si nous parlons des nanotechnologies et des nanosciences filles de l'évolution de nos connaissances récentes sur l'infiniment petit. En effet, comme nous allons le voir dans les prochains paragraphes, l'origine grecque, même si elle aurait pu convenir parfaitement à nos concepts, était déjà prise. Nous allons donc examiner pourquoi et comment cette confiscation de l'étymologie s'est opérée dès la première décennie du vingtième siècle, et en quoi le choix de l'origine latine est plus

---

<sup>9</sup> Sur cet aspect précis, voir le point suivant sur l'étymologie latine du préfixe « nano » ou Joachim et Plévert, 2008. Annexe II, p. 174.



conforme d'un point de vue purement historique et conventionnel, puisque rien n'interdit vraiment de recourir à la racine grecque du morphème « nano ».

### 1.1.2. En quoi l'étymologie est-elle latine ?

« Nanotechnologie », au sens le plus répandu aujourd'hui, est un concept relativement récent dont l'origine en tant que telle est japonaise. En effet, nous devons à Norio Taniguchi (voir à ce sujet de Kerorguen (2006) p. 19 ; Béland et Patenaude (2009) p. 10 ; Joachim et Plévert (2008) p. 178), spécialiste en science des matériaux à l'université des sciences de Tokyo, la formation du mot « nanotechnologie » qu'il utilise pour la première fois en 1974. Si nous décomposons ce mot, nous obtenons trois éléments constitutifs, notamment un préfixe « nano », un radical « techno » et un suffixe « logie » qui correspondent respectivement à leur équivalent grec *νανος* (*nânos*) qui se traduit par nain, *τέχνη* (*téchnè*) qui signifie art, habileté et *λόγος* (*logos*) qui veut dire parole ou discours. La combinaison de cette trilogie reproduit la néologie justement composée par Taniguchi. Mais, malgré la vraisemblance de cette structure du concept, nous verrons que les choses ne sont pas aussi simples qu'elles paraissent.

En fait, il y a d'autres histoires possibles de l'origine et de la composition de ce concept. Christian Joachim raconte qu'une légende dit que le poète grec Mimnerme de Colophon (630 – 600, avant J. C.) était tombé amoureux d'une charmante muse joueuse de flûte nommée *Nannô*. Selon lui, à cette même époque, la fille du roi ligure Nann préféra un des marins grecs partis du port de Phocée pour cette partie sud de la Gaule au futur époux qui lui était destiné. Ainsi, lors du banquet, des petits gâteaux au miel que l'on appelait encore des *nannos* sur le port de Marseille des siècles plus tard y furent servis avant de tomber dans l'oubli. Ainsi, dit-il, « ni les philosophes grecs qui « inventèrent » les atomes, ni, beaucoup plus tard, la mise au point de la microscopie optique ne firent renaître « nanno » pour qualifier les mille petites choses de la nature invisibles à l'œil nu, alors même que *nannos* signifie « nain » en grec ancien. » (Joachim et Plévert, 2008, Annexe II, p. 173). En effet,

c'est le préfixe « micro » du grec μικρός (*mikros*) qui signifie « petit » qui ravira la vedette à « nano » et s'imposera comme synonyme par excellence de tout ce qui est petit. « Micro » est ainsi souvent associé à tout ce qui est invisible à l'œil nu et que seuls des instruments appropriés comme le microscope peuvent permettre de voir.

Cependant, cette belle histoire d'amour, peut-être pas assez marquante pour qu'on s'en souviennne, ne sera pas retenue pour inspirer les nouveaux développements de la science moderne, ni au début du XX<sup>e</sup> siècle, ni à sa fin. De l'avis de Joachim, le premier usage du préfixe « nano » orthographié « nanno » avec deux « n » remonte à l'année 1909 en Allemagne à l'occasion d'un séminaire de la Société allemande de zoologie. Le professeur de zoologie de l'université de Kiel, Hans Lohman propose le nom de *Nannoplankton* pour désigner les algues de taille microscopique que ses recherches lui ont permis d'observer à l'aide d'un microscope optique. Le choix de Lohman est motivé par le fait que, selon lui, *nannos* est la traduction grecque du mot allemand *Zwerg* qui signifie « nain ». Cependant, il choisit de conserver les deux « n » de *nannos* auquel il fait perdre son statut originel de substantif pour en faire un préfixe. Il convient de reconnaître qu'aujourd'hui encore, certains biologistes se définissent du champ de la nannobiologie et interagissent à travers la revue spécialisée *Journal of Nannoplankton Research* qui leur sert d'espace d'échange et de partage des résultats de leurs recherches. Il convient aussi de souligner que d'autres nannobiologistes étudient actuellement les nannobactéries dont les dimensions seraient bien inférieures à 100 nanomètres. En effet, les bactéries constituent les plus petits organismes vivants connus de notre écosystème, en l'état actuel de nos connaissances. Les plus petites d'entre elles mesurent 200 nanomètres alors que les bactéries ordinaires peuvent atteindre 1000 nanomètres. Seuls les virus parviennent à battre les nannobactéries en termes de petitesse ; or ceux-ci ne sont pas classés parmi les organismes vivants autonomes du fait de leur incapacité à se reproduire tout seuls. Il semble, cependant, que de nouvelles bactéries encore plus petites aient été découvertes avec des dimensions qui varient entre 100 et 20 nanomètres. Du coup, ces nannobactéries battent tous les records du vivant. D'où le témoignage suivant de Joachim et Plévert :

Elles sont si petites qu'elles ne devraient tout simplement pas exister. En effet, pour se nourrir et se reproduire, en un mot, pour être vivant, un organisme doit a priori contenir le nécessaire de survie, en l'occurrence de l'ADN, des ribosomes qui fabriquent les protéines et un cytoplasme, c'est-à-dire un gel où baignent ces composants. Tout cela se trouve scellé dans la membrane plasmique, protégé par une paroi rigide (dont les mycoplasmes sont toutefois dépourvus), ce qui prend de la place. Les théoriciens ont calculé que la taille d'un organisme vivant ne peut pas être inférieure à 180 nanomètres. (Joachim et Plévert, 2008, p. 120).

Ces nouvelles bactéries bouleverseraient donc les normes établies et mettraient en questions nos certitudes actuelles. Pour Joachim et Plévert, elles constitueraient, par conséquent, soit les plus petits assemblages de molécules capables de vivre selon l'approche descendante de la miniaturisation, soit une monumentale machine macromoléculaire naturelle qui aurait la faculté de vivre, selon la conception « monumentaliste » (sur laquelle nous reviendrons plus amplement au chapitre II) qui privilégie l'approche ascendante. Pour le professeur Luc Montagnier, à l'origine de la découverte du virus du SIDA, si l'existence de ces bactéries se confirmait, on pourrait les qualifier d'Objets Bactériens Non Identifiés (OBNI). Comme on peut le voir, le choix de l'appellation, par analogie avec l'acronyme OVNI (Objet Volant Non Identifié), n'est pas fortuit. Cette allusion à l'univers encore mythique d'une vie supposément extraterrestre cache mal l'embarras dans lequel une telle corroboration plongerait la communauté scientifique tout entière.

Cependant, confrontés de plus en plus souvent à l'échelle moléculaire, les scientifiques du début du XX<sup>e</sup> siècle ont dû faire preuve de créativité afin de trouver le mot qui qualifierait le mieux les nouvelles dimensions qui font le quotidien de leurs travaux. Ainsi, afin de désigner la taille des molécules, l'unité de longueur adoptée fut le « millionième de millimètre », officiellement qualifié de « septième-centimètre » ou « mico-millimètre » à l'époque. Ainsi, alors que la recherche du terme approprié rencontrait quelques difficultés, les recherches sur les rayonnements émis ou transmis par des gaz évoluaient rapidement et la longueur d'onde des rayons X, mille fois plus courte que celle de la lumière, venait d'être mise en évidence. Cette situation rendait la définition de nouveaux sous-multiples du mètre nécessaire. C'est pourquoi, comme en attestent Joachim et Plévert,

Il suffit de parcourir les discours des prix Nobel de physique entre les années 1900 et 1920 pour s'en convaincre : ils reportent leurs résultats avec parfois cinq zéros après la virgule. De même, dans les articles scientifiques de l'époque, la longueur d'onde des rayons X est estimée en centimètres, soit environ 0,000000001 centimètre ! Les longueurs d'onde apparaissaient alors en angström, d'après le physicien suédois Jonas Ångström, l'un des fondateurs de la spectroscopie. Il a établi la carte du spectre du rayonnement solaire, c'est-à-dire sa palette de couleurs, en exprimant la longueur d'onde de la radiation sous forme de multiples du dix-millionième de millimètre ( $10^{-10}$  mètre), unité qui devient l'angström (noté Å) en 1905. (Joachim et Plévert, 2008, p. 175).

Dans ce contexte particulier, le préfixe « nano » est sollicité une seconde fois. Mais, cette fois, le doublement de la consonne est abandonné et cette nouvelle construction renvoie clairement à la milliardième partie du mètre. Cette décision fut prise en 1958, à l'occasion d'une rencontre du Comité international des poids et mesures, entérinant ainsi l'idée originale du Soviétique G. Bourdoun qui la proposa dès 1956. Si l'on en croit Joachim et Plévert, le choix de l'étymologie latine, « *nanus* », dans la construction du préfixe « nano » tient au fait qu'une règle primordiale du Comité international des poids et mesures préfère le recours au grec pour désigner les multiples et le latin pour les sous-multiples. Cette décision du Comité sera déterminante pour une définition plus précise de ce que recouvre le préfixe « nano » dont le nanisme ne suffit pas à déterminer les mesures concernée par la réalité qu'il est censé recouvrir.

En conséquence, alors que la première utilisation du préfixe « nano » réfère à une origine grecque, la seconde se rapporte à la version latine. Les premières utilisations de ce lexème répondent essentiellement à deux préoccupations : la description d'objets de plus en plus petits et la métrologie. En définitive, même si « *nano* » en latin ou « *nannós* » en grec signifient bien « nain », le sens que l'on a donné à ce substantif transformé en préfixe est bien celui du milliardième de mètre ( $10^{-9}$  m) issu de la référence au latin et non au grec. C'est pourquoi dire comme Mark et Daniel Ratner la chose suivante : « Le préfixe "nano" (issu du grec *nanos*, « nain, petit ») signifie un milliardième ( $10^{-9}$ ). » (Ratner, 2003, « Chap. 1 : Introduction au monde des nanotechnologies », p. 7), c'est amalgamer l'origine latine et l'origine grecque



parce que, comme nous l'avons vu, le milliardième de mètre ne réfère pas à l'étymologie grecque.

Il n'en demeure pas moins que dès le début des années 1960, les physiciens acquièrent le savoir-faire qui leur permet de dessiner sur la surface de certains matériaux des traits dont la largeur ne dépasse pas 100 nanomètres. Cette incursion vers l'infiniment petit va s'accroître et se perfectionner au fil du temps, donnant naissance vers la fin des années 1970 à la physique dite « mésoscopique ». Celle-ci s'intéresse à l'étude des objets de la taille d'une macromolécule dont les dimensions sont situées entre 10 et 100 nanomètres. Pour Joachim et Plévert, cette nouvelle perspective ouverte par la physique mésoscopique annonce le début d'une troisième histoire du préfixe « nano » qui n'est plus seulement celle d'une description d'objets ou de leur mensuration, mais plutôt celle de leur manipulation et de leur manufacture. Il constate que :

Quand le chimiste Ari Aviram, des laboratoires de recherche d'IBM près de New York, imagine en 1974 une diode moléculaire, c'est-à-dire un composant électronique qui laisse passer le courant dans un seul sens, constituée d'une seule molécule, son poids est très inférieur à celui d'une protéine ! Ainsi, avec la biologie moléculaire, la physique mésoscopique et l'électronique moléculaire, la recherche se dirige inexorablement vers le monde d'en bas. Pourtant, nos deux compères « nanno » et « nano » sont totalement absents du titre des séminaires et des conférences scientifiques d'alors. (Joachim et Plévert, 2008, p. 177-178).

Tout porte à croire que la volonté de rattacher l'avènement des nanotechnologies à une histoire récente des sciences et des technologies ne saurait être justifiée par l'enchaînement des événements que l'on évoque souvent pour expliquer la naissance de cette nouvelle dimension de notre savoir et montrer que dans le fond les nanos ne sont pas si radicalement nouvelles qu'on le dit, beaucoup d'autres leur avaient balisé le chemin. Il ne nous semble pas que la moindre relation de cause à effet puisse être établie de façon objective entre les progrès réalisés après les années 1960 en miniaturisation électronique, en microphysique ou encore en chimie moléculaire et les nanotechnologies issues de l'invention du microscope à effet tunnel et de la vision de Drexler. Un tel constat pose une question cruciale qui est

au cœur de la littérature actuelle sur les nanosciences et les nanotechnologies. D'aucuns attribuent au physicien Richard Feynman la qualité de précurseur incontestable et quasi prophétique des nanotechnologies. Mais, qu'en est-il véritablement ? Si précurseur il y a eu, quel eut été son rôle dans l'émergence des nanos ? Si nous accordons un sens aussi large au terme « précurseur », ne pourrions-nous pas remonter jusqu'à Démocrite pour en trouver un ou plusieurs ?

## 1.2. Les signes des précurseurs

Il n'est pas aisé d'identifier de lointains précurseurs aux nanotechnologies parce que toutes les allusions décelables dans l'histoire de la pensée relèvent plus de la miniaturisation que de l'ingénierie moléculaire. En effet, à moins de faire des nanotechnologies un synonyme pur et simple de la miniaturisation, si l'on entend par « précurseur » quelqu'un qui, par son action, a ouvert la voie aux nanotechnologies, il n'y a rien de tel dont nous puissions témoigner dans le cadre de nos investigations. Par contre, si l'on entend par ce mot l'idée que certaines pensées ou actions pourraient être rapportées après coup aux nanotechnologies, cela est fort probable et l'histoire des sciences regorge de tels exemples. En effet, de Démocrite à Feynman, nous pouvons évoquer la théorie de l'atome, l'histoire des peintres miniaturistes, celle des vitriers du Moyen Âge, voire l'intuition de Napoléon sur l'importance des détails ou celle plus connue et souvent considérée comme visionnaire de Richard Feynman en décembre 1959 ou encore celle de Gordon Moore avec sa fameuse loi empirique sur le doublement quasi biennal du nombre de processeurs sur une puce électronique. Commençons par examiner ce qui pourrait être considéré comme l'apport de Démocrite aux futures technologies de l'infiniment petit après cette petite mise au point sur l'histoire de la miniaturisation.

### 1.2.1. Petite histoire de la miniaturisation

La miniature a traversé tout le Moyen âge, d'Orient en Occident, et elle se caractérise par une volonté de réduire à des dimensions les plus petites possible que les techniques de l'époque permettent d'atteindre des choses du monde ou de l'imagination. François Pupil dans son livre intitulé *La miniature* définit celle-ci en ces termes :

Nous entendons par miniature une peinture de petite taille, ayant exigé de son auteur une grande minutie d'exécution et présentant une telle fragilité qu'un verre doit presque toujours la protéger et un encadrement raffiné exalter sa préciosité ou mettre en valeur son format réduit. Sans nous prononcer sur l'origine du mot, partagée entre la préparation du minium de l'enluminure et le mignard qui sous-entend petitesse et préciosité, nous définissons donc la miniature par des critères spécifiques de virtuosité technique, due à son exiguité, et de raffinement dans son encadrement. (Pupil, 1993, p. 14).

Ainsi présentée, la miniature, en tant qu'art pictural, a revêtu des formes diverses et variées pouvant passer de la décoration d'ouvrages ou de vitraux au portrait ou à l'autoportrait. Dans l'étude qu'il a consacrée à l'histoire de cet art dans la Lorraine du XVI<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle, Pupil soutient que les miniatures les plus anciennes de la collection qu'il a examinée sont peintes sur du cuivre, puis le vélin (parchemin à base de peau de veau ou d'agneau) concurrença le métal avant de céder sa place à l'ivoire qui devint, en France tout au moins, le support de prédilection des miniaturistes. Comme en témoignent certaines créations de la taille d'un bouton décoré, le double *Portrait de Louis XVIII et de la Duchesse d'Angoulême* (cat. n° 343<sup>10</sup>) ne dépassait pas 19 millimètres. Nous verrons que cette façon de définir la miniature par la « virtuosité technique » n'est pas totalement différente des procédés par lesquels les ingénieurs d'aujourd'hui miniaturisent. En effet, ce n'est pas la petitesse qui fait la miniature.

<sup>10</sup> Pupil (1993) : voir p. 214, pour ce portrait double face représentant Louis XVIII (1755 – 1824) et la Dauphine, Marie Thérèse de France, duchesse d'Angoulême (1778 – 1851) et dont le diamètre mesure 19 mm.

L'histoire de la miniaturisation est inséparable de celle de l'enluminure qui consistait à décorer ou orner des livres, des rouleaux ou encore des manuscrits. Son origine la plus lointaine connue est égyptienne. Elle était appliquée, entre autres, à la décoration du livre des morts dont le plus célèbre connu est celui d'Any et remonte à la 18<sup>e</sup> dynastie (vers 1570 av. J.-C., *British Museum*, Londres).

Selon Pupil, c'est la fonction de la miniature qui explique en partie la séduction qu'elle exerça sur ses inconditionnels. En effet, portés en bijoux, enchâssés sur une tabatière, accrochés sur des murs ou des paravents, les chefs-d'œuvre des miniaturistes furent synonymes de luxe et de commodité puisqu'il était facile de les porter ou de les emporter avec soi sans qu'ils ne soient encombrants. Cependant, cet art qui a connu son apogée vers la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle est devenu aujourd'hui « avant tout l'art de la réduction appliquée aux objets usuels et plus spécialement à la voiture. » (Pupil, 1993, postface). On peut étendre à souhait cette liste puisque ni les téléphones mobiles, ni les ordinateurs, ni aucun de nos appareils électroménagers n'échappent à cette volonté de toucher les limites de la dimension la plus petite possible et cette tendance ne s'est point démentie depuis l'antiquité. Elle continuera à hanter les savants, les artistes et même les hommes politiques, si l'on en croit l'intérêt avéré de Napoléon pour les petites dimensions. Mais, avant lui Démocrite avait déjà eu l'intuition de l'infiniment petit.

### 1.2.2. Démocrite d'Abdère candidat à la paternité des nanos

Dans le numéro spécial du magazine « Science et Vie » d'avril-mai 2010, Stéphane Fay exprime l'idée assez courante, et que nous comptons réfuter, selon laquelle « l'humanité se sert des nanotechnologies depuis longtemps sans le savoir. » (Fay, 2010, p. 53). Nous verrons que contrairement au Monsieur Jourdain de Molière qui est capable de faire de la prose sans le savoir, on ne peut pas faire de la nanotechnologie sans le savoir, ou alors on a toujours fait de la nanotechnologie sans le savoir. En effet, on peut dire que tous les phénomènes macro trouvent leur origine profonde et leur explication au cœur de l'univers quantique.



Si l'on considère l'histoire de l'humanité dans sa globalité, on peut faire remonter l'histoire de la miniaturisation au premier individu qui a eu l'idée de détacher une partie d'un arbre ou d'un rocher afin de la rendre plus adaptée à sa force et à sa taille afin d'atteindre un but déterminé. Ainsi, progressivement, les pierres taillées sont devenues des pierres polies, puis des outils manufacturés plus complexes, plus petits, plus malléables et plus efficaces. Ainsi, la tendance à la miniaturisation ne s'est pas démentie. Elle s'est même intensifiée au fil du temps et particulièrement à partir du XIX<sup>e</sup> siècle avec les progrès scientifiques et technologiques qui ont abouti à la révolution industrielle. Mais, si nous remontons aux premiers balbutiements de la science, autrement dit aux présocratiques, nous trouvons les premières références à l'infiniment petit. En effet, Démocrite d'Abdère, né vers 460 avant notre ère, croit avoir découvert l'essence même de l'univers, la dernière brique de la matière, ce sans quoi rien ne saurait être et dont tout est fait, la constituante unique et universelle de toute chose : l'atome. La physique démocritéenne s'impose, ainsi, selon l'historien de la philosophie Émile Bréhier comme :

(...) la première physique corpusculaire bien nette : la masse infinie où se trouve mélangées les semences de tous les mondes est faite d'une infinité de petits corpuscules invisibles à cause de leur petitesse, indivisibles (atomes), complètement pleins, éternels, gardant chacun la même forme, mais présentant une infinité de formes différentes, à qui il donne le nom d'idées, celui même que Platon donnera plus tard à des essences également éternelles ; entre les atomes, nulle autre différence que leur grandeur et leur forme, ou bien s'ils ont même grandeur et même forme ; que leur position, entre plusieurs combinaisons de mêmes atomes, nulle différence que l'ordre relatif des atomes<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Émile Bréhier, 2004. *Histoire de la philosophie*, p. 70 [1<sup>ère</sup> édition 1930-31-38-64]. Ici, Bréhier fait référence à l'exposé du système de Démocrite par Aristote dans sa *Métaphysique*, A, 4, 985b, 15. En effet, Aristote soutient : « Les différences de l'être disent-ils, ne viennent que de la proportion du contact et de la tournure. Or la proportion, c'est la figure, le contact, c'est l'ordre, et la tournure, c'est la position : ainsi A diffère de N par la figure, AN, de NA par l'ordre, et Z, de N par la position. – Quant au problème du mouvement : d'où et comment, les êtres le possèdent, ces philosophes l'ont, comme les autres, négligemment passé sous silence. » Cf. Aristote, *Métaphysique*, Tome 1, A, 4, 985b, éd. Vrin, Paris, 1970, p. 40-41.

Si nous acceptons l'avis d'Aristote sur le questionnement des Milésiens, nous pouvons envisager la possibilité que la question à laquelle ces deniers essayaient d'apporter une réponse fût celle de la nature de la matière dont les choses sont faites. En effet, selon Aristote, « La plupart des premiers philosophes ne considéraient comme principe de toutes choses que les seuls principes de nature matérielle. » (Aristote, 1970, Tome 1, A, 3, 983b p. 27). Même si Bréhier nous prévient contre toute tentation d'anachronisme puisque, pour lui, cette question est biaisée, car Aristote la pose dans le langage de sa propre doctrine, il n'en demeure pas moins que les réponses apportées par les présocratiques sur leurs véritables préoccupations de l'époque s'appliquent, à tout le moins par ricochet, au questionnement du Stagirite. Ainsi, la réponse proposée par Démocrite retiendra l'attention de la communauté scientifique plusieurs siècles après sa formulation.

Ainsi, pour avoir théorisé l'idée que tout ce qui nous entoure est constitué de ce qu'il convient de considérer comme des briques élémentaires de la matière, Démocrite pourrait être considéré avec pertinence comme l'un des pères historiques du *bottom-up* qui, contrairement au *top-down*, constitue l'une des caractéristiques fondamentales de ce que nous entendons par nanotechnologie. Nous venons, donc, de voir l'une des nombreuses déclinaisons du *top-down* dans le paradigme de l'atomisme des présocratiques. Examinons à présent en quoi Napoléon aurait pu s'arroger le titre tant convoité de précurseur des nanos.

### 1.2.3. Napoléon, précurseur des nanotechnologies ?

Louis Napoléon Bonaparte ou Napoléon I<sup>er</sup> (à partir du 2 décembre 1804) est né le 15 août 1769 à Ajaccio, un an après l'achat de la Corse par Louis XV à la république génoise. Il est le second fils de Carlo Maria Buonaparte et de Maria Letizia Ramonilo, issu d'une famille de treize enfants dont huit seulement atteignent l'âge adulte. Il appartient à la petite noblesse corse d'origine génoise. Son père a lutté pour l'indépendance de la Corse contre les troupes royales au côté de Pasquale Paoli. Il eut une réputation d'enfant turbulent, querelleur, orgueilleux et « corse de



caractère et de nation ». Les convictions politiques de son père, avocat au conseil supérieur de Corse, semblent avoir influé sur le fait qu'il a été élevé dans le ressentiment vis-à-vis de la France. Plutôt médiocre en français, il fut particulièrement brillant en science et en mathématiques<sup>12</sup>. Il saura en tirer profit tout au long de son parcours qui le mènera au sommet de l'Europe. Selon Éric Sartori :

Si la France est ainsi devenue un véritable empire des sciences, ce n'est évidemment pas par hasard. Une grande part du mérite en revient au premier des Français, Premier consul, puis Consul à vie, puis Empereur. Aucun autre dirigeant politique n'a nourri une telle passion pour la science, n'a entretenu de liens aussi privilégiés avec les savants de son époque, n'a autant estimé et même aimé le monde scientifique. Il se voulut membre à part entière de la communauté scientifique et celle-ci l'accepta comme tel. Napoléon, dont les dons pour les mathématiques furent reconnus dès sa jeunesse par les plus grands mathématiciens, dont Laplace, acquit une culture scientifique impressionnante qu'il entretint tout au long de sa vie. Le jeune général, le Premier consul mettant en place les plus importantes réformes administratives, judiciaires, politiques qu'aient connu notre pays, l'Empereur aux prises avec l'Europe entière et même le proscrit de Sainte-Hélène manifestèrent la même curiosité intellectuelle, le même goût et la même compréhension des problèmes scientifiques et trouvèrent toujours le moyen et le temps d'actualiser leurs connaissances, ainsi que le constatent Nicole et Jean Dhombres. (Sartori, 2003, p. 10).

Outre sa passion pour les sciences, Napoléon fut élu membre de l'Institut en 1798 et siégea même aux côtés du mathématicien, astronome et mathématicien Pierre Simon marquis de Laplace et de son collègue mathématicien Lacroix. Ainsi, il eut à travailler avec eux à la consignation de rapports et de communications. Sa

---

<sup>12</sup> Selon Éric Sartori, 2003 : « Napoléon bénéficia d'une des meilleures formations scientifiques qui existât alors en France, celle des écoles militaires, et, particulièrement intéressé par les mathématiques, il sut en tirer profit. À dix ans, il étudia quelques mois à Autun, où il acquit un niveau suffisant en français (quoique son orthographe restât assez déficiente). Il entra ensuite au Collège des Minimes de Brienne, où il étudia jusqu'à l'âge de quinze ans. C'est là que naquit sa passion pour les mathématiques. Condisciple du futur empereur, Bourrienne en témoigna : « J'échangeais parfois avec lui la solution des problèmes que l'on nous donnait à résoudre et qu'il trouvait sur-le-champ, avec une facilité qui m'étonnait toujours, contre des thèmes et des versions dont il ne voulait pas entendre parler ». À la sortie de Brienne, le jeune Bonaparte fut jugé apte à suivre les cours de l'école militaire de Paris. Ses notes révèlent qu'il excellait en mathématique et géométrie, avait un bon niveau en histoire et géographie et était carrément mauvais en toute langue (français compris). La formation très axée sur les sciences de l'École militaire lui convint parfaitement (algèbre, géométrie, calcul élémentaire, mécanique, hydrostatique représentaient 20 heures sur 48), et il réussit l'examen d'entrée à l'artillerie en un an au lieu de deux. Vingt ans après, Laplace se souvenait de l'avoir examiné, ce qui laisse penser qu'il avait été impressionné par l'aisance du candidat. » Cf. Éric Sartori, *L'empire des sciences, Napoléon et ses savants*, Ellipses Éditions Marketing S.A., p. 10-11.

considération pour la science, sa complicité avec les savants et ses amitiés parmi les scientifiques dont le mathématicien et inventeur de la géométrie descriptive, le chimiste à l'origine de la découverte des hypochlorites et leurs applications, Gaspard Monge, Claude Louis Berthollet ne sont pas les moins connus.

Cet intérêt non feint et presque boulimique de Napoléon pour les mathématiques et les sciences laisse augurer de l'ampleur et de la qualité de sa culture scientifique. Cette partie non négligeable de la personnalité aux passions multiples du fondateur du Premier Empire donne une certaine portée à ses commentaires ainsi qu'à ses analyses sur ces questions touchant les sciences et les technologies. D'où l'intérêt du dialogue suivant rapporté par le naturaliste Geoffroy Saint-Hilaire et mis en exergue par Éric Sartori dans son ouvrage consacré à l'héritage scientifique constitué par Napoléon pour la future France. Cet échange mémorable entre Monge et Napoléon aurait eu lieu avant leur embarcation à bord de la frégate *La Muiron*<sup>13</sup>, alors qu'ils étaient sur le point de quitter l'expédition d'Égypte qui a eu lieu en 1799 :

Nous avons du loisir Monge : passons ce temps à faire de la philosophie, et, pour y fournir matière, je vous raconterai mes pensées de premier âge. Le métier des armes est devenu ma profession ; ce ne fut pas mon choix, et je m'y trouvai engagé du fait des circonstances. Jeune, je m'étais mis dans l'esprit de devenir un inventeur, un Newton. — Que dites-vous général, répliqua Monge, vous ne connaissez donc pas le mot de Lagrange : nul n'atteindra la gloire de Newton, car il n'y avait qu'un monde à découvrir. — Oh ! que m'opposez-vous là, M. Monge ? L'ami Berthollet, profondeur dans le savoir du jeu des affinités, au sujet des molécules principes, non sans doute, Berthollet n'est point de votre avis. Qui a fait attention au caractère d'intensité et de tract à très courte distance des actions des particules, dont nous sommes témoins journellement ? Monge, cela est-il trouvé ? Or, voyez : cela ne serait-il pas plus beau, plus grand, mais surtout plus profitable à la société, qu'une spéculation philosophique ? Newton a résolu le problème du mouvement dans le système planétaire ; c'est magnifique, pour vous autres, gens d'esprit et de mathématiques ; mais que moi j'eusse appris aux hommes comment s'opère le mouvement qui se communique et se détermine dans les petits corps, j'aurais résolu le problème de la vie dans l'univers. Cela fait comme je l'ai supposé, j'eusse dépassé Newton de toute la distance qu'il y a entre la matière et l'intelligence. Par conséquent, il n'y a donc rien d'exact dans votre mot de Lagrange. Le monde des détails reste à chercher. Voilà

<sup>13</sup> Certains pensent que c'est à bord de la frégate que cet échange entre Gaspard Monge et Napoléon a eu lieu. C'est le cas de Joachim et Plévert. Mais, bien entendu, l'important ici n'est pas le lieu où les propos ont été tenus, mais bien la teneur des échanges. Cf. Joachim et Plévert, 2008. *Nanosciences : La révolution invisible*, Seuil, p. 32.



cet autre monde, et c'est le plus important de tous, que je m'étais flatté de découvrir. D'y penser, j'en suis toujours aux regrets ; d'y penser me fait mal à l'âme. (Sartori, 2003, p. 7, souligné dans le texte).

Ainsi, nous pouvons voir à travers les propos du futur empereur dans ce dialogue avec son ami Monge, qu'il avait déjà conscience du caractère presque magique de ce qu'il appelle les « petits corps ». Sa formidable intuition en ce XVIII<sup>e</sup> siècle finissant l'amène à penser qu'en maîtrisant l'infiniment petit il résoudrait « le problème de la vie dans l'univers ». Napoléon pousse l'audace au point de défier Isaac Newton, le maître incontesté de la science des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, et de considérer que la connaissance des « détails (...) reste à chercher », et lui aurait permis de répondre au problème fondamental de la vie. Immense projet qui semble loin de se démentir au vu de l'évolution de nos connaissances et de notre savoir-faire scientifico-technologique. Ainsi que nous allons le voir, 160 ans après ces spéculations pour le moins futuristes du futur Napoléon I<sup>er</sup>, Richard Feynman fera une conférence devenue célèbre qui donnera de lui l'image d'un visionnaire, d'un précurseur direct de ce qui sera connu près de trois décennies après 1959 sous le nom de « nanotechnologie ».

#### 1.2.4. L'origine de l'idée serait-elle états-unienne (Feynman) ?

De l'avis de la plupart des spécialistes qui ont évoqué la question de l'origine des nanotechnologies dans leurs écrits, la possibilité même des nanotechnologies a été envisagée pour la première fois par le Prix Nobel de physique Richard Feynman. En effet, cette idée, très répandue au sein de la communauté scientifique, repose sur la conférence désormais historique donnée par Feynman précisément le 29 décembre 1959 au *Caltech* (*California Institute of Technology*) à l'occasion de la réunion annuelle de la société américaine de physique. Selon Bernadette Bensaude-Vincent, « En 1959, Richard Feynman déclarait dans une conférence à l'*American Physical Society* aujourd'hui republiée et presque sacralisée : « *there is a plenty of room at bottom* » (il y a plein de places au fond !). » (Bensaude-Vincent, 2004, p. 34). À l'occasion de cette communication désormais célèbre, Feynman

s'étonnait que l'on ne s'intéressât pas encore, à son époque, aux nanotechnologies et posait cette question rhétorique : « *Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopedia Britannica on the head of a pin*<sup>14</sup>? » (Pourquoi ne pouvons-nous pas écrire la totalité des 24 volumes de l'*Encyclopédie Britannique* sur une tête d'épingle ?). À travers une démonstration rigoureuse, Feynman répondra en soutenant que c'est tout à fait possible. Selon la traduction proposée par les Ratner, ces derniers soutenaient qu'« en l'an 2000, lorsque les gens regarderont un peu en arrière, ils seront stupéfaits de voir que nous avons attendu les années 1960 pour commencer à nous occuper sérieusement des nanosciences. » (Ratner. 2003, p. 40). Il est clair que ce recours au concept de « nanosciences » dans le présent extrait constitue un anachronisme assez douteux, puisqu'il est très peu probable que Feynman ait pu connaître un morphème qui n'a été forgé qu'en 1974. Cela dit, pour en revenir à l'argument de Feynman, Jean-Louis Pautrat pense le reproduire en ces termes :

Son raisonnement, basé sur une simple arithmétique, est le suivant : si la taille d'un texte est réduite 25 000 fois dans chaque direction, alors la surface occupée par les quelque 30 000 pages de l'*Encyclopaedia Britannica*, qui est normalement de 1 500 m<sup>2</sup>, se trouve réduite à seulement 2,5 mm<sup>2</sup>. C'est effectivement la taille d'une grosse tête d'épingle. (Pautrat, 2002, p. 20).

Cette mise au point effectuée, nous pouvons donner la parole à Didier Stièvenard qui pense que l'histoire semble, en tout cas, donner raison au célèbre physicien de *Caltech*. C'est pourquoi, dans le chapitre 3 du tome 1 de l'ouvrage collectif *Les Nanosciences*, il soutient, dans la même veine que Pautrat (2002, p. 20), en commentant une figure sur laquelle la lettre *M* est inscrite sur une surface de silicium hydrogénée par déhydrogénation locale, que « la largeur du trait d'écriture est de 3 à 4 nm et la surface de l'image est de 60 nm x 60 nm. Si l'on calcule le nombre de lettres que l'on pourrait écrire sur un millimètre carré (la surface d'une tête d'épingle), on obtient le contenu de l'*Encyclopaedia Universalis* (environ 400

<sup>14</sup> <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html> (accédé le 4\08\2011).

millions de caractères), possibilité prévue par Feynman en 1959<sup>15</sup> ! » Dans ce même ordre d'idée, Yan de Kerorguen attribuera avec beaucoup d'emphasis la qualité de précurseur des nanotechnologies tout naturellement à Richard Feynman :

« There is plenty of room at the bottom ». C'est en ces termes sibyllins pour le profane que Richard P. Feynman, lors de la conférence annuelle de l'American Physical Society, au California Institute of Technology, annonce en 1959, quelques jours après Noël, la naissance symbolique du nanomonde. « Pourquoi ne pourrions-nous pas écrire l'intégralité des vingt-quatre volumes de l'encyclopédie *Britannica* sur la tête d'une épingle », explique-t-il. Pour lui, « les principes de la physique, pour autant que nous puissions en juger, ne s'opposent pas à la possibilité de manipuler des choses, atome par atome ». Ces propos fondateurs d'un pionnier qui, six ans plus tard, se verra décerner le prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'électrodynamique quantique reflètent la solide conviction de Feynman qu'un misérable petit tas de molécules ou d'atomes, disséqué au scalpel à volonté ou rassemblé pièce par pièce, donnera des propriétés nouvelles hors du commun. À l'époque, ce célèbre physicien atomiste, qui a participé au projet Manhattan, affirme que la manipulation du monde à l'échelle atomique pouvait ouvrir la voie aux projets les plus fous. Il ne se doutait cependant pas de l'ampleur qu'aurait sa vision prémonitoire. Encore moins les physiciens qui, avant lui, soutenaient mordicus qu'aucune expérience ne pouvait être réalisée sur un électron unique, un atome ou même une seule molécule. (Yan de Kerorguen 2006, p. 18-19).

Kerorguen défend ici clairement et sans aucune ambiguïté l'idée très répandue selon laquelle le génie de Feynman a su anticiper la marche de la science au point de prédire son devenir avec plus de deux décennies d'avance. Si tel fut le cas, il va de soi qu'une telle force prédictive a rarement été rencontrée dans l'univers scientifico-technologique et les mérites qu'il attribue au génie de Feynman seraient même sous-estimés. Mais, force est de reconnaître que cette paternité de Feynman est de plus en plus contestée par d'autres experts tels que Jean-Philippe Bourgoin, Christian Joachim et Laurence Plévert (2008). Il convient de concéder à ces sceptiques le fait que le concept de « nanotechnologie » n'a jamais été utilisé dans ce fameux discours de Feynman. Il y a bien quelque chose d'anachronique dans l'attribution au physicien états-unien de la paternité de ce qui apparaîtra plus de 20 ans plus tard sous une dénomination qui n'est apparue que quinze ans après la fameuse conférence du futur prix Nobel de physique (1965).

---

<sup>15</sup> Marcel Lahmani (dir. publ.), *Les Nanosciences*, tome I (2006) p. 102. Il faut noter que dans le texte original de la conférence de Feynman, il ne s'agit pas de l'*Encyclopedia Universalis*, mais plutôt de l'*Encyclopaedia britannica*.

Ainsi, pour Joachim et Plévert, Feynman, bien qu'il ait vécu jusqu'en 1988 et qu'il pût assister à l'émergence de la microscopie à effet tunnel, ainsi qu'aux progrès de la miniaturisation en microélectronique et en micromécanique, ne s'est jamais attribué la moindre paternité en relation avec ces questions et n'a jamais fait le lien entre son discours de la fin des années 1950 et ces progrès du début des années 1980. Il semble qu'il parlait souvent de la physique des ordinateurs dans ses enseignements à l'institut de technologie de Californie, mais il ne s'est jamais intéressé, ni de près ni de loin, aux nanotechnologies. En outre, pour Joachim et Plévert, c'est Eric Drexler le responsable de l'imposture que l'on fait subir à Feynman malgré lui. C'est ce que de Kerorguen semble confirmer lorsqu'il dit de Drexler :

Un admirateur de Feynman, un jeune étudiant du MIT nommé Éric Drexler a senti le bon filon. Vingt ans ont passé. Mais les bases théoriques posées par son maître à penser restent disponibles. Drexler les reprend et les développe. De nombreuses années encore seront nécessaires pour que le jeune homme obtienne une plus grande attention et parviennent à mobiliser des équipes et des moyens financiers. (de Kerorguen 2006, p. 19).

Ces propos de Yan de Kerorguen confortent Joachim et Plévert dans l'idée que Feynman n'est devenu célèbre dans le nanomonde qu'à partir des années 1990 grâce à Drexler qui l'a, pour ainsi dire, déterré pour lui faire jouer le rôle de faire-valoir servant ainsi la cause de ses propres idées. Pour étayer leur analyse, Joachim et Plévert reviennent sur un extrait du discours de Feynman et le commentent en ces termes :

Mais, revenons sur ce que Feynman a dit ce soir-là. Je veux décrire un domaine peu défriché, mais où beaucoup reste à faire. [...] Il y aura d'énormes applications techniques. [...] Je veux parler de la manipulation et du contrôle des choses à petite échelle. [...] Il existe un monde incroyablement petit, situé en bas. »

Rendons-lui hommage pour avoir perçu les enjeux de la miniaturisation et interpellé les chercheurs sur l'exploration du monde d'en bas. Cela fait-il de lui un visionnaire ? Il s'est certes posé la question de savoir « ce qui se passerait si on pouvait arranger les atomes un par un, à volonté ». Mais, il n'a pas apporté de solution, ni imaginé un instrument capable de le faire. Il évoquait là l'ultime précision de fabrication et non la taille ultime des dispositifs eux-mêmes. Il mène, dans ce discours, un exercice de prospective. Il fait remarquer combien la démarche du physicien qui



consiste à repousser les limites s'avère souvent fructueuse. Et de citer l'exemple de deux physiciens : l'un a cherché à atteindre des températures toujours plus basses, l'autre des températures toujours plus élevées. Ce faisant, les deux ont ouvert de nouveaux champs de recherche. Pourquoi, propose Feynman, ne pas pousser à l'extrême la miniaturisation des dispositifs et des machines ? Il entrevoit la possibilité de stocker une information à l'aide de quelque 100 atomes. Mais aujourd'hui on sait qu'un seul atome pourrait suffire. (Joachim et Plévert, 2008, p. 31).

Selon cette analyse, le brillant physicien de Caltech n'a fait que montrer les immenses possibilités de la nouvelle miniaturisation qui en était à leurs balbutiements dans les années 1950. En fait, selon un raisonnement très rigoureux et des calculs prospectivistes très précis, Feynman réussit théoriquement à mettre l'encyclopédie Britannique dans une tête d'épingle sans trop de difficultés. Mais, pour nos deux auteurs, sa prouesse, bien que remarquable, n'est pas suffisante pour lui octroyer le titre de précurseur des nanotechnologies.

Afin de clore ce tour d'horizon des précurseurs réels ou supposés des nanotechnologies, il convient de reconnaître que les objets ou les matériaux nanométriques, comme les atomes ou les molécules, existent depuis l'avènement de la matière. Cependant, la capacité que nous avons de les observer et de les appréhender est très récente et nous pouvons avancer le début des années 1980, sans risquer de nous tromper. Nous reviendrons en détail sur ce point. Ainsi, de même que l'on peut soutenir que l'existence des atomes qui composent la nature a été théorisée pour la première fois par Démocrite, la possibilité de les manipuler un par un est une réalité que les inventeurs du microscope à effet tunnel, Binnig et Rohrer, ont rendue possible très concrètement. Dans le cadre des travaux de l'Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), Jean-Pierre Launay, Professeur à l'université Paul Sabatier de Toulouse et directeur du Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES), affirmait ce qui nous paraît problématiser le rôle surqualifié que l'on veut prêter à Feynman :

Chronologiquement, on a coutume de dater le début des nanotechnologies au discours historique du grand physicien Feynman qui avait expliqué en 1959 : « There is plenty of room at the bottom » « il y a plein de place en bas ». Cette conférence, très souvent

citée de nos jours, a fait très peu de bruit à l'époque. Elle est pratiquement passée inaperçue pendant au moins vingt ans<sup>16</sup>. [en gras dans le texte.]

La question que cette remarque de Launay nous inspire est celle de savoir s'il faut attribuer la qualité de précurseurs des nanosciences et des nanotechnologies à tous ceux qui dans l'histoire ont eu à envisager l'idée ou la possibilité de l'infiniment petit, même si leurs écrits ou leurs pensées sur ce sujet sont restés vagues, méconnus et inopérants dans l'évolution de la science. Ou, *a contrario*, faut-il simplement savoir raison garder et reconnaître le fait qu'il y a eu quelque chose d'inouï et de quasi imprévisible dans cette aventure qui nous a ouvert les portes du nanomonde ?

Si l'on entend par précurseur le fait d'avoir envisagé de près ou de loin l'idée même de l'infiniment petit, il va sans dire que Feynman ne saurait damer le pion ni à Napoléon ni à Démocrite. Dans cette optique, la question du tout petit ou du « détail » serait simplement synonyme de miniaturisation. Or nous verrons qu'il est très tentant de réduire les nanotechnologies à la diminution des proportions vers des dimensions de plus en plus petites, mais qu'une telle restriction aurait du mal à résister à l'analyse critique. C'est pourquoi, comme nous l'avons dit au tout début de notre examen, si l'on entend par « précurseur » quelqu'un qui, par son action lointaine, a ouvert la voie directement aux nanotechnologies, il n'y a, clairement, rien de tel dans l'histoire que nous avons visitée. Cependant, l'on peut envisager d'entendre par ce mot l'idée que certaines pensées ou idées pourraient être rapportées après coup aux nanotechnologies. Nous venons de voir que cela est tout à fait possible puisque l'histoire des sciences et même celle de la littérature regorgent d'exemples d'illustres personnages ou de génies qui avaient déjà entrevu la possibilité de taquiner l'infinitésimal. D'autre part, il n'est pas sûr que Binnig et Rohrer, eux-mêmes, aient envisagé avant Eric Drexler une incursion d'une telle portée dans le nouvel univers auquel l'instrument dont ils sont les inventeurs nous donne accès désormais.

---

<sup>16</sup> Compte rendu des travaux de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, <http://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-off/i3658.asp> (accédé le 3/04/2011).

Mais voyons ce que nous apprend la loi de Moore sur l'avènement du concept de « nanotechnologie » puisqu'en définitive il serait difficile de parler sans précaution de précurseur en ce qui concerne les nanotechnologies, car toutes les allusions identifiables dans le passé font plus référence à la miniaturisation, à une action virtuelle sur le monde ou à sa compréhension, qu'à l'ingénierie moléculaire. En effet, à moins de faire des nanotechnologies un synonyme pur et simple de la miniaturisation, on ne peut pas envisager sérieusement l'idée que quelqu'un a pu prédire l'ingénierie moléculaire, voire atomique, avant 1981. Par contre, le fait que l'on ait pu envisager d'aller plus loin vers le bas ne fait pas l'ombre d'un doute comme la prospective de Moore permet d'en rendre compte.

#### 1.2.5. La loi de Gordon Moore... une prédiction empirique de type inductiviste

Gordon Moore est à l'origine de la désormais célèbre loi qui porte son nom et qu'il a proposée comme une conséquence des observations qu'il avait faites sur les tendances à la miniaturisation de l'époque et dont le calcul de l'évolution de la suite permettait d'envisager la conclusion à laquelle il est parvenu.

En fait, dans les années 1940, John Von Neumann, mathématicien états-unien d'origine hongroise, précurseur de la théorie des jeux et un des pères de l'informatique, est aussi le premier à s'intéresser à la reproduction d'une machine, sa duplication par elle-même ou la fabrication de sa propre copie. Cependant, c'est l'invention du transistor en 1948 qui bouleversera le destin des machines. Ainsi, les inventeurs de ce dispositif révolutionnaire qui leur a valu le prix Nobel de physique huit ans plus tard, John Brattain et William Shockley des laboratoires Bell, sont les pères de l'électronique moderne. Leur invention constitue un pas important vers le circuit intégré à la fin des années 1960 et du microprocesseur au milieu des années 1970. Dispositif électronique à trois électrodes ou plus, le transistor peut servir de commutateur, d'amplificateur, d'oscillateur et être utilisé dans les télécommunications et dans les systèmes électroniques. De ce fait, il effectue les différentes tâches dévolues aux tubes à vide thermoïoniques, aux amplificateurs et

d'autres dispositifs encombrants et pesants. On peut dire qu'à partir de 1948, l'électronique va connaître une évolution sans précédent. Ainsi, « grâce à son faible encombrement et à sa consommation réduite, le transistor a rapidement remplacé les volumineux tubes à vide de nos radios, frayant ainsi la voie à la miniaturisation, voie qui petit à petit fait le nid des nanos. » (de Kerorguen, 2006, p. 18). Ce fut donc la tendance implacable à la diminution des proportions des constituants des appareils électroniques depuis 1948 qui amena Moore à faire le constat d'une certaine régularité dans ce processus de réduction. Il semble que c'est en 1965 que Gordon Moore, futur cofondateur de la société Intel avec Robert Noyce, fit cette constatation alors qu'il préparait un article sur l'évolution prévisible de l'électronique. Il découvrit que « (...) la courbe de croissance des performances des puces électroniques montre que chaque nouvelle puce est approximativement deux fois plus puissante que la précédente et son délai de développement varie entre 18 et 24 mois. » (Wautelet et al. 2006, p. 4).

Avant de revenir sur cette fameuse « loi », voyons ce que Joachim et Plévert nous disent du contexte historique. Selon eux :

La technologie des circuits intégrés répondait à la nécessité d'automatiser l'assemblage des composants électroniques sur un même support. Au début, il n'était donc pas question de miniaturisation, mais l'idée va vite s'imposer, par exemple pour l'électronique embarquée sur les missiles. Cette électronique contrôle la stabilité des missiles sur toute leur trajectoire, grâce à un gyroscope qui mesure leur inclinaison et à des systèmes qui régulent l'éjection des gaz de combustion. Les ingénieurs électroniciens, alliés à une armada de physiciens, ont aussi profité du programme *Apollo* de conquête de l'espace pour progresser dans la miniaturisation des dispositifs électroniques. Dans les missiles et dans les fusées, les gains de place et de poids sont d'un intérêt majeur. En outre, plus les transistors sont petits, plus ils sont rapides, donc performants. Plus nombreux sur une même puce, ils augmentent la capacité de traitement du circuit. Ainsi, la densité des transistors sur les puces ne va cesser d'augmenter à partir des années 1960, suivant une loi empirique établie par Gordon Moore en 1965. (Joachim et Plévert, 2008, p. 38).

Du coup, l'optimisation des performances des dispositifs électroniques embarqués rendue possible par la mise au point du transistor est au cœur de la Recherche et Développement (R&D) des années 1960. C'est dans ce contexte particulier que, le jeune diplômé de l'université de Californie, Gordon Moore, qui avait travaillé avec



l'un des inventeurs du transistor William Shockley, va formuler une idée qui le rendra célèbre. Invité par le responsable du magazine *Electronics* à rédiger un article (Moore, 1965) sur l'avenir de l'électronique, il fait un raisonnement ambitieux sur une tendance encore timide à la miniaturisation. En effet, à l'époque, le circuit intégré le plus sophistiqué ne contenait qu'une trentaine de composants parmi lesquels on pouvait trouver quelques transistors. C'est avec si peu d'éléments et une immense foi en ces technologies que Moore effectua des calculs<sup>17</sup> basés sur le constat selon lequel le nombre de composants dans un circuit intégré est passé de quatre à huit puis à seize l'année suivante qu'il remarqua que leur nombre doublait plus ou moins quasiment chaque année. Si l'on en croit Joachim et Plévert, « loin de vouloir établir une loi, il souhaitait seulement faire passer le message que les composants allaient devenir de plus en plus petits, les circuits plus complexes et moins chers. » (Joachim et Plévert, 2008, p. 39). En énonçant sa constatation, Gordon Moore était loin de se douter de la course à la miniaturisation qui se profilait à l'horizon des années qui vont suivre la publication de son article. C'est seulement par la suite que le professeur Carver Mead de l'Institut technologique de Californie donna le nom de « loi de Moore » à cette hypothèse audacieuse qui n'était, en fait, qu'une observation empirique. Pour Jean-Louis Pautrat : « À la fois constat rétroactif et outil de prévision, la loi de Moore est, en fait, devenue le plan de bataille de la microélectronique. » (Pautrat, 2002, p. 25). Cependant, Pautrat est beaucoup plus optimiste que Moore et Mark et Daniel Ratner quand il dit :

Il y a donc de bonnes chances de voir l'évolution engagée se poursuivre pendant au moins les dix prochaines années. Un ralentissement se manifestera alors, non pour des raisons technologiques, mais pour des raisons purement économiques. Qui découlent elles aussi de la loi de Moore. Les puces sont en effet de plus en plus efficaces et compactes, elles coûtent de moins en moins cher, mais les « fabs » - les unités de production - sont aussi de plus en plus coûteuses. Valant déjà plus d'un milliard d'euros en 2000, elles dépasseront les 5 milliards en 2008. C'est ce que l'on appelle la seconde loi de Moore : le coût démesuré des équipements induit le gigantisme, la concentration industrielle, et il est finalement à terme susceptible de retarder l'introduction de nouvelles technologies. Ce phénomène se produira lorsque la mise au point d'une génération de composants exigera un effort d'investissement si considérable qu'il

---

<sup>17</sup> Sur le calcul qui permet à Gordon Moore de formuler sa loi, voir l'explication de John D. Cressler (2009) dans l'ANNEXE 1, p. xxx.

faudra bien la rentabiliser avant de décréter son obsolescence et de pourvoir à son remplacement. (Pautrat, 2002, p. 220-221).

Nous verrons que ce nano-optimisme de Pautrat ne sera pas partagé par les publications plus récentes sur la question et que, même si les Ratner adoptent son opinion sur le doublement régulier de la capacité des puces qui a permis, selon lui, de multiplier par 100 millions le nombre de transistors logé sur une puce en l'espace de quarante ans, ils attribuent l'essoufflement futur de la loi de Moore non pas au facteur économique, mais aux exigeantes lois de la nature et à la barrière quantique. Ce que la société *Intel* elle-même semble confirmer par la voix d'un de ses responsables, Paolo Gardini, directeur de la stratégie technologique du fondateur, qui a publié dans le courant de l'année 2011 un rapport sur le sujet<sup>18</sup>. Nous reviendrons plus amplement sur la question de la limite de la loi de Moore. Pour l'instant, occupons-nous de savoir ce que dit vraiment la désormais célèbre loi de Moore.

Formulée pour la première fois en 1965, la première loi de Moore stipulait que le nombre de transistors doublait tous les ans et que leurs coûts restaient stables à plus ou moins long terme. Puis, reformulée en 1975, la seconde loi de Moore tenait compte des rapides évolutions, notamment l'invention du transistor en 1947 suivie de celle du circuit intégré en 1958 puis du microprocesseur en 1971 par l'équipe de Moore lui-même. Ainsi, il fit une deuxième prédiction selon laquelle le nombre de transistors des microprocesseurs sur une puce de silicium double tous les deux ans. On ne sait pas trop comment, mais cette prédiction initiale sera reformulée et ce qui sera retenu comme loi de Moore, ce sera tous les « dix-huit mois » plutôt que « tous les deux ans ». Pour conforter notre propos, refaisons appel à Mark et Daniel Ratner qui soutiennent que :

Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel Corporation, a décrit le développement croissant des circuits électroniques intégrés à l'aide de deux lois, dites lois de Moore. La première de ces lois indique que la taille des transistors installés sur une puce diminue de moitié environ tous les dix-huit mois, cela signifie que là où l'on pouvait installer un transistor, on peut en placer mille quinze ans plus tard (ce qui est vérifié). (Ratner, 2003, p. 18-19).

---

<sup>18</sup> [www.zdnet.fr/actualites](http://www.zdnet.fr/actualites) (accédé le 15/06/2011).

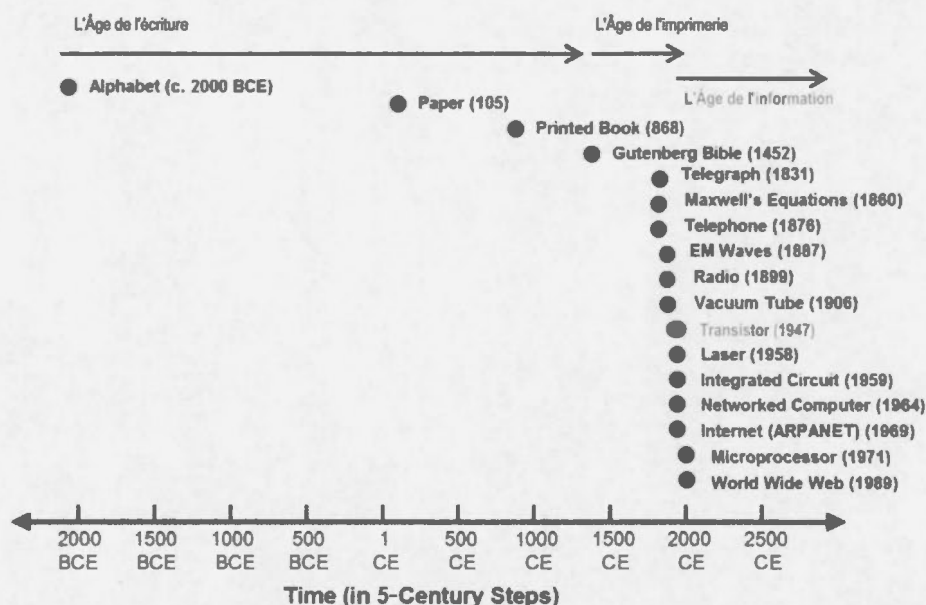


Figure 1.1 : Dates importantes dans l'histoire des communications humaines (Cressler, John D. 2009. *Silicon Earth: Introduction to the Microelectronics and Nanotechnology Revolution*, Figure 2.1.4.1 partiellement traduite par nos soins, p. 5.)

Toujours selon les Ratner :

Si la première loi de Moore est plutôt une bonne nouvelle, puisqu'on lui doit une augmentation des capacités des ordinateurs, la seconde, qui en est un corollaire, est moins favorable. Elle spécifie que le coût d'une chaîne de fabrication de puces double toutes les deux générations, c'est-à-dire tous les trente-six mois (...).

Les fabricants de puces électroniques sont donc directement concernés par ce qui adviendra de leurs chaînes de fabrication lorsque leurs composants atteindront des tailles nanométriques. Non seulement ils devront supporter l'envolée des coûts (qui dépassent déjà plusieurs millions d'euros), mais surtout ils ne seront plus certains, à moins d'une redéfinition totale de leur méthodologie, que les puces fabriquées agiront exactement comme attendu en raison du changement des propriétés d'un corps à l'échelle nanométrique. D'ici quelques années (vers 2010 selon certains experts), tous les principes fondamentaux utilisés dans la fabrication des puces devront être revus afin de passer des micropuces aux nanopuces. Pour la première fois depuis que Moore a établi ses lois, la conception des puces électroniques devra vivre une révolution, et non plus vivre une évolution. Alertées par de tels faits, les grandes firmes réalisent que leur place dans la construction des futurs nanopuces n'est en rien assurée. Ignorer ces inexorables avancées leur serait économiquement fatal. (Ratner, 2003, p. 19-20).

La force prédictive de la loi de Moore est ainsi sur le point de s'essouffler à cause des barrières physiques naturelles indépassables tout en révélant les inconnues persistantes quant à la flambée des coûts pour les industriels et les incertitudes à la fois méthodologiques et opérationnelles. Il faut tenir compte du fait que l'une des implications de la loi de Moore est que pour augmenter la puissance des puces, l'industrie se voit condamner à optimiser la densité des éléments qui les composent ; ainsi, cette course effrénée a pour conséquence l'entrée en désuétude de ces mêmes usines de fabrication des composants électroniques qui se trouvent dépassées par leurs propres prouesses technologiques. Ces avancées fulgurantes entraînent un doublement du coût des chaînes de production tous les dix-huit mois. Mais, loin d'être un frein à la pérennisation de la course vers l'infiniment petit, il se pourrait que cette limite soit une véritable aubaine, le socle d'un sérieux engagement de la société vers le développement des nanotechnologies. En effet, les écueils rencontrés par la loi de Moore pourraient être un moment crucial de la fin de son évolution constante pour ouvrir la voie à la révolution tant espérée par bon nombre de chercheurs et thuriféraires de la science. C'est pourquoi, selon les Ratner, il y a bien des raisons d'être optimiste quant aux capacités dont ces nouvelles technologies sont porteuses et c'est assez pour que nous y consacrons plus de temps et plus d'énergie. En effet :

Outre l'électronique à l'échelle nanométrique (souvent appelée "électronique moléculaire"), les nanosciences doivent relever d'autres défis pour maintenir les avancées que la révolution électronique a permises en économie, en médecine et en termes de qualité de vie. Certes, améliorer les technologies actuelles nous fera encore un peu avancer, mais des barrières physiques, et non psychologiques, se dresseront rapidement. La seule solution pour les franchir réside dans les nanotechnologies. N'en déplaise à ceux qui jugent exagérées les attentes liées aux nanotechnologies, le potentiel de celles-ci est suffisamment important pour qu'on s'y intéresse. (Ratner, 2003, p. 20).

D'où l'impérieuse nécessité de dépasser Moore, puisque la caducité de sa loi est déjà prédite hors de tout doute possible.



### 1.2.6. “More Moore” ou “No more Moore”

Comme nous l’avons annoncé plus tôt, selon un article de *CBS Interactive* publié d’abord par Michael Kanellos sur le site <http://news.cnet.com> le 1<sup>er</sup> décembre 2003 puis repris en version française sur [www.zdnet.fr](http://www.zdnet.fr) par Christophe Guillemain trois jours après :

Intel pense passer à une finesse de gravure de 16 nanomètres en 2013, puis de 5 nanomètres à l’horizon 2018. Pourra-t-on encore miniaturiser davantage ? « Cela semble être une limite fondamentale », explique à notre rédaction américaine Paolo Gargini, directeur de la stratégie technologique du fondeur, qui vient de publier un rapport sur le sujet<sup>19</sup>.

En réalité, l’agonie de la loi de Moore est annoncée et en voie d’être dépassée. Après avoir pensé en juillet 2002 que sa « loi » « a encore de beaux jours devant elle<sup>20</sup> », Gordon Moore a fini par lui prédire un ralentissement puis une fin prochaine sous sa forme actuelle, tout au moins, eu égard au changement de paradigme spectaculaire qui se produit lorsque la miniaturisation bascule dans l’univers gouverné exclusivement par la mécanique quantique. En 1971, le premier microprocesseur<sup>21</sup> Intel, du nom de la société fondée par Moore et Noyce en 1968, intégrait 2250 transistors, en 2006 un Pentium IV en compte environ 50000 fois plus et en 2007 on pouvait en compter 250 millions sur une puce. La dernière limite de la miniaturisation à franchir est le cap des 5nm. Selon de Kerorguen, « chez Intel, on pense que la limite physique de la gravure en 5nm sera atteinte en 2018. Les étapes précédentes seront 32 nm en 2009 et 22 nm à l’horizon 2011. » (de Kerorguen, 2006, p. 23). L’imminence de la fin de la loi de Moore est formulée de façon assez claire par de Kerorguen qui soutient :

<sup>19</sup> <http://www.zdnet.fr/actualites/la-loi-de-moore-atteint-ses-limites-predit-intel-39132668.htm> pour la version française de Christophe Guillemain et [http://news.cnet.com/2100-1008\\_3-5112061.html?tag=cd\\_lede](http://news.cnet.com/2100-1008_3-5112061.html?tag=cd_lede) pour la version originale de Michael Kanellos. (accédé le 15/06/2011).

<sup>20</sup> <http://www.zdnet.fr/actualites/la-loi-de-moore-atteint-ses-limites-predit-intel-39132668.htm> (accédé le 15/06/2011).

<sup>21</sup> Reprenons ici la définition du microprocesseur proposée par Joachim et Plévert : « Un microprocesseur est un ensemble de circuits électroniques intégrés à la surface d’un semi-conducteur, comprenant une mémoire, un calculateur, des circuits de synchronisation et un ensemble de fils d’interconnexion. » [Joachim et Plévert 2008, note de bas de page n° 2, p. 39].

Seulement voilà, cette course à la miniaturisation, source d'économie et de gains de performances, bute désormais sur les problèmes inédits posés par l'échelle nanométrique. À force de miniaturiser les particules de silicium, des effets inattendus se produisent, notamment des transferts d'électrons imprévisibles. De là découle l'hypothèse selon laquelle la loi de Moore cesserait d'être valable d'ici dix ou quinze ans puisque l'on approche la taille d'agrégats atomiques. Les chercheurs doivent donc trouver les moyens de résoudre les problèmes de fabrication et de fiabilité et de coût en R&D qu'entraîne cette miniaturisation. (de Kerorguen, 2006, p. 23).

Ainsi, plus on progresse vers l'infiniment petit, plus on se heurte à de nouvelles difficultés inattendues, liées à la spécificité du monde quantique dont on atteint les limites supérieures en quelque sorte. D'où la prédiction tentée par Mark et Daniel Ratner qui estimaient que :

D'ici quelques années (vers 2010 selon certains experts), tous les principes fondamentaux utilisés dans la fabrication des puces devront être revus afin de passer des micropuces aux nanopuces. Pour la première fois depuis que Moore a établi sa loi, la conception des puces électroniques devra vivre une révolution, et non plus suivre une évolution. (Ratner, 2003, p. 20).

En fait, l'explication donnée par Joachim et Plévert révèle que les problèmes ont commencé à se poser aux ingénieurs dès que la barre des 65 nanomètres a été atteinte. En effet, à cette dimension, la couche d'isolant séparant l'électrode de commande du « canal » semi-conducteur n'a qu'une épaisseur de 1,2 nanomètre, ne comportant ainsi pas plus de cinq ou six couches d'atomes. Cette épaisseur ultramince pose un problème non négligeable, puisqu'elle compromet la fonction d'isolant de la couche en rendant possible le passage des électrons de l'électrode de commande au canal. Une telle défaillance entraîne une fuite du transistor. En effet, l'augmentation du courant de fuite entraîne la diminution de la résistance de l'isolant ainsi que celle du champ électrique entre l'électrode de commande et le canal, ce qui rend le contrôle du passage des électrons dans le transistor bien compliqué. C'est pour parer à cette difficulté que la couche isolante en oxyde de silicium, habituellement très efficace à bonne épaisseur, a été remplacée par des matériaux plus isolants, d'autres oxydes à base de « terres rares » comme le hafnium. Une telle substitution a permis une réduction significative du courant de fuite. Mais, toute modification des matériaux qui forment le transistor provoque une suite de réactions de type domino. C'est ce phénomène qui a conduit au

remplacement du métal habituel de l'électrode par un nouvel alliage métallique pour « accommoder » le nouvel isolant. Ainsi, ce courant de fuite présent à cette dimension infinitésimale n'est que l'expression d'un phénomène quantique propre à la propriété des électrons à cette échelle. Il constitue en fait la première manifestation des propriétés quantiques des électrons sur laquelle butent les spécialistes de la miniaturisation en essayant de concevoir des transistors à 65 nanomètres. De cet état de fait, Joachim et Plévert tirent la conséquence suivante :

Présent [le courant de fuite] dans les transistors à 65 nanomètres, il constitue la première émergence gênante des propriétés quantiques des électrons. Jusqu'alors, les ingénieurs n'en tenaient en général pas compte dans l'élaboration des transistors. Désormais, la poursuite de la miniaturisation du transistor va passer par une maîtrise des effets quantiques. En retour, cette maîtrise va permettre de fabriquer de nouveaux dispositifs, d'une taille comprise entre 10 et 100 nanomètres, différents des transistors, d'où émergeront d'autres phénomènes quantiques. (Plévert, 2008, p. 45-46).

Nous ne développerons pas maintenant toutes les implications de cette projection de l'ingénieur du CNRS et de la journaliste scientifique, mais nous y reviendrons plus largement dans notre prochain chapitre, quand viendra le moment de tirer au clair la question de la définition des nanotechnologies. Cependant, maintenant que nous avons fait le tour d'une partie des précurseurs présumés des nanotechnologies et que nous avons souligné les raisons possibles qui pourraient en faire de bons candidats pour cette qualité, nous verrons qu'il y a souvent une once d'arbitraire chaque fois qu'il est question d'attribuer la qualité de génie ou de visionnaire à l'un ou à l'autre de nos protagonistes.

En réalité, si l'on ne considère que l'aspect miniaturisation dans les nanotechnologies, Richard Feynman autant que Gordon Moore pourraient être considérés comme des précurseurs. Les différences entre ces concepteurs de l'infiniment petit seraient des différences de formulation et d'argumentation. Mais ils ont tous plongé leurs regards très profondément vers le bas. Voyons comment cette technologie qui fait couler autant de salive et d'encre a pris pied dans l'univers de la science et de la technologie au début des années 1980 avec l'invention des

instruments adéquats et, peut-être, comprendrons-nous mieux la difficulté de la désignation des précurseurs.

### 1.3. L'avènement d'une technologie à l'échelle de l'atome

L'origine matérielle des nanotechnologies, si l'on peut dire, est helvétique. Elle est le fait de deux ingénieurs d'IBM : Binnig et Rohrer. C'est précisément leur invention qui permet d'envisager très sérieusement la conquête de l'infiniment petit. Cette place de l'instrument, Bernadette Bensaude-Vincent nous rappelle qu'elle n'est pas révolutionnaire en elle-même, puisque l'histoire des sciences fournit un certain nombre d'exemples qui le montrent. En effet :

L'histoire des sciences au XX<sup>e</sup> siècle fournit maints exemples de techniques instrumentales qui ont ouvert de nouveaux champs de recherche ou profondément bouleversé des sciences traditionnelles. Ainsi la technique de diffraction des rayons X, mise au point dans les années 1920 par le physicien britannique William Lawrence Bragg (1890-1971) et son père William Henry Bragg (1862-1942), a permis de visualiser la structure microscopique interne des solides, en particulier des métaux, de connecter leur structure avec leurs propriétés. Elle a non seulement renouvelé la métallurgie, mais aussi permis l'émergence de la physique du solide et de la biologie moléculaire avec la découverte de la structure de l'ADN. Dans les années 1990, la recherche en biologie moléculaire a été profondément transformée par l'introduction de la PCR (*Polymer Chain Reaction*, amplification en chaîne par polymérase). Dans les mêmes décennies, la mise au point du microscope à effet tunnel qui permet de « visualiser » et de déplacer des molécules ou des atomes individuels a ouvert le champ des nanosciences et des nanotechnologies. La liste des techniques qui ont révolutionné les pratiques de recherche au XX<sup>e</sup> siècle n'en finirait pas : elles vont des plus génériques, comme l'informatique, aux plus spéciales, comme les « pinces optiques ». (Bensaude-Vincent, 2009, p. 44).

La question qui nous préoccupe ici n'est donc pas celle de la nouveauté radicale du déterminisme de l'instrument sur la science qu'il est censé servir, mais plutôt de le faire reconnaître dans le cas qui nous intéresse. Selon Bensaude-Vincent, la recherche sur les instruments débute en Allemagne à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et débouche sur une discipline qui ne dit pas son nom et que Terry Shinn et Bernward Joerges (Joerges et Terry Shinn, 2001, p. 2-13) qualifient de *research technology*.



Cette dernière constitue, de fait, un pont entre l'ingénierie et la science parce que la mise au point d'instruments de haute précision nécessite à la fois un savoir théorique et des savoir-faire. En effet, « il s'agit de produire des instruments précis, fiables, robustes et standard, utilisables aussi bien dans les laboratoires de recherche que dans l'industrie. » (Bensaude-Vincent, 2009, p. 47). C'est ce rôle clef des *research technologists* qui pousse Bensaude-Vincent à les considérer comme les véritables artisans de la technoscience entendue comme « hybridation entre deux entités traditionnellement séparées qui effacent de surcroît les cloisons étanches entre les disciplines académiques. » (Bensaude-Vincent, 2009, p. 47). C'est ce caractère déterminant du rôle de l'instrument qui permet de rendre compte de cette dissipation des frontières entre les disciplines et qui lui confère son caractère indispensable dans le développement de la technoscience dont les nanotechnologies sont une sorte de prolongement (*spin-off*). Ainsi, toujours selon l'historienne des sciences :

Les instruments jouent donc un rôle décisif dans l'avènement de la technoscience. Ils tiennent en fait plusieurs rôles : de moyens au service de la recherche ; de force motrice qui pousse de l'avant, accélère la marche des sciences tout en transformant ses visées et aspirations ; enfin en devenant eux-mêmes des objets de recherche, les instruments cessent d'être de simples instruments, extensions de nos organes ou médiations entre nous et la nature. Ils sont d'authentiques dispositifs insérés dans le monde du laboratoire ou de l'usine. (Bensaude-Vincent, 2009, p. 47).

Bien entendu, nous ne comptons pas nous étendre sur tous les aspects de l'instrumentation évoqués ici par Bernadette Bensaude-Vincent, mais après en avoir présenté quelques-uns et leur principe de fonctionnement, nous verrons l'importance des nanoscopes dans la naissance et le développement des nanotechnologies ainsi que les perspectives rendues possibles par leur avènement.

### 1.3.1. Les instruments de l'exploration de l'infiniment petit

On sait que les années 1960 ont vu le début de la miniaturisation électronique et qu'en évoluant cette technique a débouché sur ce qu'on appelle aujourd'hui les nanofabrications descendantes (du macro au nano). Pour les nanofabrications

ascendantes, en revanche, il a fallu attendre l'an 2000, ce qui confirme aux yeux de certains spécialistes la clairvoyance de Feynman, sur laquelle nous reviendrons plus tard. L'approche ascendante (*bottom-up*) repose sur la réalisation d'objets artificiels en manipulant atomes et molécules alors que l'approche descendante (*top-down*) consiste à miniaturiser toujours davantage. S'il a fallu attendre autant de temps pour franchir ce pas, c'est parce que l'on ne disposait pas des outils nécessaires. En effet, aucune des techniques de fabrication disponibles, qui permettaient de réaliser des appareils de plus en plus petits comme les microtours et les micrograveurs, n'était opérationnelle à l'échelle nanométrique. Comme le soutiennent Mark et Daniel Ratner, il n'était pas possible, à l'époque de voir des atomes individuels, encore moins de les manipuler. Mais aujourd'hui, observer l'infiniment petit est devenu possible grâce à la mise au point des microscopes électroniques ou aux microscopes à force atomique. Ainsi, les outils qui permettent de voir, de mesurer et de manipuler la matière à l'échelle nanométrique existent ou sont en phase de mise au point. C'est la raison pour laquelle les nanotechnologies prennent maintenant, et seulement maintenant, leur essor. Un scientifique peut désormais, par une commande à distance *via* Internet, déplacer un atome sur une plateforme dans un laboratoire distant de plusieurs milliers de kilomètres. Une telle évolution n'a été possible que grâce aux progrès cumulés réalisés en microscopie à balayage et en technologies de l'information et de la communication (TIC). Explorons maintenant quelques modèles de cette nouvelle génération de microscopes qu'il convient aussi d'appeler nanoscopes.

Parmi les outils les plus répandus pour observer et mesurer les nanostructures, plusieurs types d'appareils sont basés sur des principes de fonctionnement divers. Ainsi, on peut citer les instruments à balayage qui sont parmi les premiers outils à avoir été utilisés en nanosciences. Puis vient la spectroscopie qui est l'étude du spectre (des couleurs) des rayonnements lumineux émis, absorbés ou diffusés par un milieu matériel et qui est bien plus ancienne que les techniques des microscopes à balayage. Ensuite, on peut parler de l'électrochimie qui est le moyen par lequel on transforme des processus chimiques en courant électrique ou, au contraire, on

produit des réactions chimiques à partir de courant électrique. Enfin, le microscope électronique remplace la lumière utilisée en optique classique par des flux d'électrons. En fait, le premier instrument à balayage réellement efficace qui a été développé est le *Scanning Tunneling Microcopy (STM)* ou microscope à effet tunnel de Gerd Binnig et Heinrich Rohrer. Ces deux collègues ingénieurs chez IBM (Rüschlikon, Zürich) sont à l'origine de cette découverte révolutionnaire qui a permis plus tard, en 1989, à Don Eigler<sup>22</sup> de déplacer 35 atomes de xénon un par un et de les arranger sur une surface de nickel pour dessiner le sigle IBM. Cette prouesse technologique leur a valu le prix Nobel de physique partagé avec Ernst Ruska<sup>23</sup> en 1986.

Cette opinion est partagée par les Ratner qui soutiennent que « tous les types d'instruments à balayage reposent sur une idée développée pour la première fois dans les années 1980, aux laboratoires IBM de Zurich. » (Ratner, 2003, p. 41). Selon eux, le principe est simple. En effet, si l'on frotte sa main sur une surface quelconque, on sait qu'il s'agit de velours, d'acier, de bois ou de bitume. Ces matériaux exercent une force différente sur un doigt qui joue le rôle dans une telle expérience d'instrument mesurant la force, la dureté. C'est selon ce principe que fonctionnent les microscopes à balayage. Ainsi, quand l'on passe son doigt ou la pointe du microscope sur une surface, le balayage s'effectue de la même façon. C'est la sensibilité de l'appareil, qui se situe au-delà de l'échelle nanométrique, parfois au niveau d'un simple atome. La pointe du microscope mesure diverses propriétés en glissant le long de l'objet, sachant que chaque type de mesure nécessite un appareil particulier. C'est ainsi qu'

---

<sup>22</sup> Don Eigler est chercheur dans le centre de recherche IBM d'Almaden en Californie. Il réalise la première écriture atomique en 1989 avec 35 atomes de xénon sur une surface de nickel à l'aide d'un microscope à force atomique. Selon Louis Laurent, « L'ensemble était sous vide, refroidi près de zéro absolu (sinon les atomes auraient été dispersés par l'agitation thermique). » Cf. Louis Laurent, 2007. *Les nanotechnologies vont-elles changer notre vie ? 82 questions à Louis Laurent, physicien*, p. 42.

<sup>23</sup> Ernst Ruska est l'inventeur du microscope électronique qu'il mit au point en 1931 et qui se caractérise par la mise en jeu de l'effet quantique dualité onde-matière. La récompense pour son œuvre viendra ainsi 55 ans plus tard avec ce prix Nobel partagé avec les inventeurs du microscope à effet tunnel.

un microscope à force atomique (*AFM, Atomique Force Microscopy*), par exemple, mesure la pression exercée sur la pointe de l'instrument lorsqu'elle parcourt la surface. Un microscope à effet tunnel à balayage (*STM, Scanning Tunneling Microscopy*) prend en compte la quantité d'électricité circulant entre la pointe de balayage et la surface. Cet instrument peut évaluer soit la géométrie locale de l'objet (ses protubérances de surface, (...)), soit les caractéristiques du courant électrique local. (Ratner, 2003, p. 41-42).

Pour expliquer ce fonctionnement, Michel Wautelet (2003, p. 2) affirme que :

Dans un STM, une pointe métallique, si fine que son bout n'est composé que d'un ou quelques atomes, se déplace à une fraction de nanomètre de la surface d'un solide. Grâce à un effet quantique, l'effet tunnel, des électrons peuvent passer de la pointe à la surface. En déplaçant la pointe sur la surface de manière contrôlée, on parvient à voir les atomes à leur propre échelle.

Il faut rappeler que la dimension d'un atome est de l'ordre du dixième de nanomètre. On peut noter qu'il existe trois modes d'interactions pointe surface : le *pulling mode*, le *pushing mode*, et le *sliding mode*<sup>24</sup>. Dans cette même catégorie, on peut compter les microscopes de champ proche optique ou *Scanning Near Field Optical Microscope (SNOM)*. Selon Jean-Louis Pautrat, dans le cas de ce type de nanoscope, « la sonde est une fibre optique amincie de diamètre bien inférieur à la longueur d'onde qui collecte la lumière et la transporte jusqu'à un détecteur. » (Lahmnani, 2006, Introduction de Jean-Louis Pautrat, p. 21). En outre, le microscope à force magnétique (*MFM, Magnetic Force Microscopy*) est doté d'une

---

<sup>24</sup> « *Pulling mode* » : ce mode est associé à des forces attractives entre la pointe et l'adatome. La pointe positionnée au-dessus de l'adatome, est rapprochée de la surface. Le courant tunnel augmente. Puis la pointe se déplace horizontalement. *I* diminue jusqu'à ce que l'adatome se déplace d'un bond vers la pointe, tout en restant sur la surface. L'intensité du courant *I* augmente alors de nouveau, et ainsi de suite.

« *Pushing mode* » : ce mode s'apparente au précédent, mais il est associé à des forces répulsives entre la pointe et l'adatome. La pointe se rapproche de la surface et se déplace horizontalement vers l'adatome. L'intensité du courant *I* augmente jusqu'au moment où la pointe repousse l'adatome qui va sur un site de surface voisin. Le courant diminue brusquement. Et ainsi de suite.

« *Sliding mode* » : Dans ce mode, les forces sont attractives entre la pointe et l'adatome, mais la pointe est plus rapprochée de la surface de telle façon que l'adatome est attiré sur la pointe. Quand la pointe approche, le courant *I* augmente et l'adatome saute sur la pointe et y reste collé. Quand la pointe se déplace parallèlement à la surface, le courant est associé à la topographie de la surface vue par la pointe décorée par l'adatome. À la fin, la pointe est rétractée et l'adatome retombe sur la surface. Ces trois modes ont été étudiés par Bartels et co-auteurs avec des molécules de CO, déplacés sur une surface de cuivre Cu(211). [cf. *Les nanosciences*, p. 100-101, sous la direction de Marcel Lahmani, article de Didier Stievenard intitulé « Microscope à effet tunnel »].



pointe aimantée qui lui permet de détecter sur la surface étudiée les structures magnétiques locales. Il fonctionne selon le même principe que les lecteurs de disque dur et des cassettes audio qui utilisent une pointe similaire. D'autres types de microscopes à balayage existent. Ils ont permis de voir, pour la première fois, des objets de dimension atomique, et de comprendre des structures d'échelle nanométrique.

Ces mêmes instruments, utilisés pour voir et mesurer les objets à l'échelle du nanomètre, servent aussi à manipuler les nanostructures. En effet, « dans ce cas, la pointe de balayage de l'instrument est employée de la même manière qu'un doigt qui, passant sur une surface malléable, peut la gratter, la rayer, la plisser. » (Ratner, 2003, p. 45). Pour arriver à manipuler les choses à cette échelle, les technologues ont recours à la lithographie, procédé inventé en 1796 par l'allemand Aloys Senefelder, mais appliqué et adapté à l'échelle nanométrique. Ainsi, ils font appel à la nanolithographie « stylo à plume » qui se sert de nanoplumes (plumes de taille nanométrique). Les microscopes à force atomique (*AFM*) permettent de construire des nanolithographes "stylo à plume" ou *DPN* (*Dip Pen Nanolithography*) qui peuvent permettre d'écrire des discours du type de celui de Feynman qui a été retranscrit à l'échelle nanométrique avec ce procédé. Ce dernier a été développé par Chad Mirkin et ses collaborateurs à l'université *Northwestern*. Les avantages de cette méthode sont l'adaptabilité et la facilité de manipulation. C'est pourquoi les *DPN* sont « des instruments privilégiés pour créer des structures nouvelles et complexes dans de minuscules volumes. » (Ratner, 2003, p. 47). Le seul problème est que ces instruments sont plutôt lents. Il y a aussi la lithographie à faisceau électronique dont Mark et Daniel Ratner pensent qu'employée également en microélectronique, elle « permettra de suivre la loi de Moore jusqu'au point où les propriétés dépendant de la taille des structures empêcheront d'aller plus loin. » (Ratner, 2003, p. 48). Il y a en plus la lithographie nanosphérique "*lift-off*", mise au point par Rick Van Duyne et son groupe de recherche à l'université de *Northwestern*. La lithographie à nanosphère dite *lift-off* (*NSL, Nanosphere Lithography*) a des avantages multiples et immenses puisque, toujours selon les

Ratner, « l'on peut utiliser un grand nombre de surfaces de types différents, et puisque l'on peut employer toute sorte de "peintures" (en réalité des molécules de métal) et déposer plusieurs couches successives de peintures sur les triangles. De plus, comme les nanotampons, et contrairement aux *DPN*, la lithographie nanosphérique est un processus parallèle, ce qui permet de placer de nombreuses sphères sur une surface et de préparer simultanément des milliers de points, voire plus. » (Ratner, 2003, p. 49). Puis, il y a la *synthèse moléculaire* qui consiste, en chimie, à produire des molécules spécifiques à partir d'autres molécules. Elle permet, aux chercheurs et aux industriels pharmaceutiques notamment, de concevoir des molécules de synthèse comme la plupart des médicaments actuels tels que la pénicilline, le Viagra et l'insuline. Ainsi, nous pouvons accorder à Yan de Kerorguen le fait que :

Grâce à l'extrême précision de ces outils d'observation et de manipulation, et notamment des pointes atomiques, les scientifiques ont donc aujourd'hui la possibilité de se promener dans l'infiniment petit. Ils y découvrent l'intimité d'un monde de microscopie électronique. Ils y observent des facettes inédites de la vie des cellules. Mais s'il est désormais possible, grâce à ces microscopes, de déplacer les atomes un par un, la tâche reste toutefois fastidieuse. Comme si on assemblait des legos avec des gants de boxe. Parvenir au projet de Drexler de créer une nanomachine capable d'assembler, d'automatiser, de dupliquer les atomes à la façon des cellules humaines n'est pas, en effet, une mince affaire. De nombreux programmes de recherche ont pour finalité la fabrication du nano-assembleur imaginé par Drexler, qui peut contenir quelques millions d'atomes intégrant au moins un levier capable de placer les atomes un par un à l'emplacement souhaité. Mais chacun s'accorde à penser que ce projet de créer un mécanisme contrôlé par logiciel, supposé permettre de combiner à vau-l'eau les atomes entre eux, demandera du temps... et de l'argent. (de Kerorguen, 2006, p. 22).

S'il nous était permis de parler de « révolution » à ce stade de notre réflexion, nous dirions que la première phase de la « révolution » nanotechnologique a été la mise au point du microscope à effet tunnel. Avant 1981, d'autres instruments d'exploration de l'infiniment petit existaient puisque Yan de Kerorguen nous apprend que dès 1953 la première image de l'atome fut obtenue en microscopie ionique (de Kerorguen, 2006, p. 151). En conséquence, nous pouvons considérer que si la poursuite de l'exploration de l'infiniment petit a débuté depuis très longtemps, les nouvelles performances atteintes depuis les années 1960, bien que

très spectaculaires, n'ont rien à voir avec les nouvelles possibilités offertes à la communauté scientifique depuis les années 1980. En effet, alors que les premières s'inscrivent parfaitement dans la continuité de la miniaturisation, on ne peut pas tout à fait en dire autant des secondes. Pour mieux comprendre cette différence en apparence insignifiante, mais aux conséquences décisives, il faut comprendre les nuances possibles et parfois subtiles entre « miniaturisation » et « monumentalisation ». À cet effet, commençons par voir quelles nouvelles perspectives sont offertes par les nouveaux instruments d'« observation » et de manipulation des nanoparticules.

### 1.3.2. Perspectives ouvertes par ces nouveaux instruments d'« observation »

Cet instrument de haute précision, cet améliorateur de l'acuité l'observationnelle du chercheur, cet outil de manipulation totalement dédié à l'échelle nanométrique, plus qu'un microscope, porte mieux le nom de nanoscope. Et, la seconde phase de ce bouleversement scientifico-technologique est insufflée par d'autres chercheurs tels que ceux de l'Université Libre de Berlin et, surtout, par celui d'IBM, Donald Eigler qui, en 1989, réussit à montrer comment le microscope à effet tunnel est sensible aux états électroniques à la surface des matériaux nobles. Il parvint ainsi à déplacer individuellement 35 atomes de xénon à l'aide du microscope de Binnig et Rohrer et à former les initiales d'IBM en se servant de la pointe du microscope comme d'une sorte de pince. En effet, de Kerorguen explique cette prouesse de la façon suivante :

(...) lorsque l'on applique une tension électrique sur la pointe du microscope, celle-ci se comporte comme une pipette capable de saisir des atomes ou des molécules individuelles. Lorsqu'on inverse la tension, la pointe dépose l'atome (ou la molécule) là où on le souhaite. Si la tension est augmentée au moment où l'aiguille se trouve exactement au-dessus de l'atome, l'atome se collera sur la pointe de l'aiguille. (de Kerorguen, 2006, p. 21).

Cependant, cette avancée inédite vers la maîtrise de l'infiniment petit comporte un certain nombre de limites que de Kerorguen ne manque pas de souligner. En effet, non seulement l'assemblage atome par atome ou molécule par molécule est peu

économique et très fastidieux, mais aucune perspective intéressante n'est envisageable ni pour l'industrie, ni pour la recherche à cause de l'impossibilité dans laquelle nous sommes actuellement à faire se dupliquer les atomes à la manière des cellules humaines. En effet, l'idée d'assemblage imaginée par Drexler repose sur l'exemple d'efficacité propre à la nature. Dans la conception de ce dernier, l'assembleur est un système contrôlé à l'aide d'un logiciel adéquat permettant l'organisation systémique des atomes entre eux. Il définit celui-ci comme une « machine moléculaire qui peut être programmée pour construire pratiquement n'importe quelle structure moléculaire à partir de produits chimiques simples. C'est l'analogue moléculaire d'une machine à commande numérique. » (Drexler 2005, Note n° 3, p. 317). Mais, il les distingue de l'assembleur limité construit de manière à brider ses capacités de fabrication afin de limiter l'utilisation que l'on en peut faire tout autant que des assembleurs universels. Il voit ceux-ci comme « la seconde génération de nanomachines » dont la spécificité est d'être des machines construites à partir d'autres matériaux que des acides aminés. Il pense même que certaines de ces petites machines seront capables de faire tout ce que les protéines savent faire, voire davantage :

En particulier, certains joueront, comme dispositifs améliorés, un rôle important dans l'assemblage des structures moléculaires. Capables, en fonction de leur design, de supporter les acides ou le vide, de geler ou de cuire, les nanomachines de seconde génération seront à même d'utiliser comme des « outils » presque tous les réactifs utilisés par les chimistes ; mais elles les manipuleront avec la précision de machines programmées. Elles seront capables de lier les atomes entre eux dans pratiquement toutes les configurations stables possibles en les ajoutant par petits groupes à la molécule en formation, jusqu'à ce que la structure complexe soit terminée. Pensez à de telles machines comme à des *assembleurs*. (Drexler, 2005, p. 18).

En fait, Drexler croit que ces assembleurs hypothétiques nous permettront de placer et de déplacer les atomes avec la possibilité de les arranger à loisir. Ainsi pense-t-il qu'« ils nous permettront de construire presque tout ce que les lois de la nature autorisent. » (Drexler, 2005, p. 18). L'ouvrage de Drexler dans lequel il évoque ces questions, *Engins de création*, traduction de la première édition en anglais sous le titre, *Engines of Creation – The coming Era of Nanotechnology* (1986), fera date et contribuera largement à faire connaître les nanotechnologies, leurs possibilités



réelles ou supposées et les enjeux sans commune mesure au cœur de ce nouveau champ de recherche scientifique et technologique. À ce titre d'ailleurs, Drexler fait figure de véritable père des nanotechnologies. Mais, l'idée de Drexler connaît de sérieuses objections tout comme celle de « molécules-robot » hypothétiques qui seraient une combinaison des molécules mécaniques aux molécules de calcul elles-mêmes embarquées dans les premières. En effet, Joachim et Plévert reprochent au fondateur du *Foresight Institute* de ne pas préciser la manière dont seraient fabriqués ces assembleurs moléculaires, futures unités de production de molécules à calcul, de molécules mécaniques ou de nanorobots. Du coup, une telle perspective est, en l'état d'avancement actuel de nos connaissances et de nos techniques, totalement irréaliste. C'est pourquoi Joachim et Plévert soutiennent :

Tels qu'ils sont décrits, ces assembleurs moléculaires de molécules-machines seraient la copie conforme ultraminiaturisée des robots utilisés dans nos usines. Par exemple, ils seraient équipés de pinces et de bras télescopiques pour attraper les petites molécules une par une et les assembler. Richard Smalley, le codécouvreur des molécules de fullerène, a objecté que, si une pince moléculaire s'emparait d'une molécule, elle n'arriverait plus à s'en débarrasser, la réaction chimique nécessaire à sa capture ne permettant simplement pas d'en assurer le relargage. En fait, rien ne prouve qu'un assembleur ait besoin d'un bras télescopique pour attraper un atome ou une molécule. Ainsi, en manipulant une petite molécule à six pieds avec la pointe d'un microscope à effet tunnel, nos collègues de l'université libre de Berlin ont découvert qu'elle peut « aspirer » quelques atomes de cuivre préalablement déposés sur la surface. Ces atomes s'accumulent les uns après les autres sous la molécule. L'expérimentateur peut larguer les atomes quand il le souhaite en enlevant avec sa pointe la molécule qui les a assemblés. (Joachim et Plévert, 2008, p. 112).

Selon eux, compte tenu de ces contraintes, la seule manière de procéder à des assemblages aujourd'hui est de recourir au nanoscope approprié et de les réaliser quasi manuellement. Autrement, le rêve d'un assemblage automatisé à l'aide de nanorobots s'activant jour et nuit dans une usine moléculaire est assez lointain et occupe, aujourd'hui encore, les intrigues de la science-fiction. Cet obstacle majeur de l'assemblage contraint des chercheurs comme Wilson Ho des Universités Cornell et Irvine (1998), Donald Eigler d'IBM Almaden (1989-90), Gerhard Meyer de l'Université Libre de Berlin à l'époque (IBM Zürich en 2009) ou Gérard Dujardin de l'université Paris-Sud à recourir au microscope à effet tunnel comme assembleur. Ils essaient ainsi de s'en servir afin de synthétiser des molécules atome

par atome ou à partir des fragments moléculaires. Mais ils se heurtent contre la sérieuse difficulté qui consiste à amener deux molécules à réagir chimiquement à l'aide de la pointe du nanoscope. Dans de telles situations, les chercheurs sont obligés de manipuler les particules avec suffisamment de précision pour trouver l'orientation idoine capable de causer la réaction chimique attendue. Or, ce type de problème ne se pose pas en chimie classique, puisqu'en solution l'agitation thermique pousse les molécules à chercher au hasard de multiples orientations et à trouver toutes seules la voie qui mène à la réaction (Joachim et Plévert, 2008, p. 113). Ainsi, l'une des caractéristiques innovantes et inédites des nanotechnologies serait la possibilité non seulement d'entrer en contact avec l'infiniment petit et de l'appréhender, mais plus encore, de le manipuler atome par atome, molécule par molécule comme des briques élémentaires de lego dont nous pouvons définir à la fois les formes et les fonctions.

Pour Drexler, ce système d'assemblage indispensable à l'évolution des nanotechnologies ne saurait atteindre son niveau optimal sans la réalisation des « nouveaux répliqueurs ». Selon lui, l'histoire témoigne de l'évolution du matériel, comme le montrent les tubes à essai d'ARN, le virus et les chiens. Ces derniers montrent que l'évolution se produit par la modification de la sélection des répliqueurs, même si nous n'avons pas nécessairement besoin de les identifier pour reconnaître une évolution. Il constate cependant que les objets aujourd'hui ne peuvent se répliquer. Il se demande alors où sont ces répliqueurs qui sous-tendent l'évolution de la technologie et quelles sont les machines à gènes. Afin d'illustrer ses propos, il soutient ce qui suit avant de préciser sa définition de ses répliqueurs :

Darwin a décrit l'évolution avant que Mendel ne découvre les gènes et les généticiens apprennent beaucoup sur l'hérédité avant que Watson et Crick ne découvrent la structure de l'ADN. Darwin n'avait pas besoin de connaissances en génétique moléculaire pour voir que les organismes variaient et que certains avaient plus de descendants.

Un répliqueur est un motif qui peut faire produire des copies de lui-même. Il peut avoir besoin d'aide : sans machines protéiques pour le recopier, l'ADN ne pourrait pas se répliquer. En fixant ces règles, certaines *machines* sont des répliqueurs ! Les entreprises fabriquent souvent des machines qui tombent entre les mains d'un concurrent. Celui-ci en apprend alors les secrets de fabrication et en construit des copies. Tout comme les gènes « utilisent » des machines protéiques pour

se répliquer, ces machines « utilisent » le cerveau et les mains des humains pour se reproduire. Avec des nano-ordinateurs dirigeant des assembleurs, la réplification des objets pourrait être automatisée. (Drexler, 2005, p. 43).

Ainsi, les machines, les humains et les nano-ordinateurs combinés aux assembleurs peuvent être des répliqueurs. Mais, pour Drexler, l'esprit humain est l'engin d'imitation par excellence, il possède une sorte de réplique du gène que Dawkins a baptisé « même » et qui constitue un répliqueur bien plus subtil que les machines protéiques et les assembleurs. En effet :

La voix, l'écriture et le graphe peuvent transmettre des designs d'un esprit à un autre avant qu'ils ne prennent forme comme matériel. Les idées qui sous-tendent les méthodes de design sont encore plus subtiles : plus abstraites que le matériel, elles ne se répliquent et ne fonctionnent que dans le monde de l'esprit et des systèmes symboliques.

Les gènes ont évolué à l'échelle de générations et d'ères géologiques ; les répliqueurs mentaux évoluent maintenant à l'échelle des jours et des décennies. Comme les gènes, les idées se séparent, se combinent et adoptent des formes multiples (les gènes peuvent être transcrits d'ADN en ARN et vice versa ; les idées peuvent être traduites d'une langue en une autre). La science ne permet pas encore de décrire la forme neurale que prennent les idées dans le cerveau, mais tout le monde peut voir que les idées mutent, se répliquent et entrent en compétition : les idées évoluent.

Richard Dawkins appelle les petits bouts d'idées qui se répliquent des « mêmes ». Il indique que les mêmes peuvent être « des airs de musique, des idées, des phrases retenues, des modes vestimentaires, des façons de fabriquer des poteries ou de construire des arches. Tout comme les gènes se propagent en passant d'un corps à un autre, d'une génération à une autre, au moyen des spermatozoïdes et des ovules, les mêmes se propagent en passant d'un cerveau à un autre en utilisant un processus, qui, au sens large, peut être appelé imitation ». (Drexler, 2005, p. 43-44).

Le problème ici, comme souvent quand on parle de nanos, est qu'avec les « nouveaux assembleurs » et les « répliqueurs » qu'il imagine, Drexler nous plonge déjà dans la prospective, voire dans la fiction. Nous verrons que parler des nanotechnologies sans se projeter dans le futur relève de la gageure compte tenu d'une caractéristique essentielle des nanotechnologies qui en fait une sorte de matrice pluridisciplinaire qui n'a pas fini à la fois de nous surprendre et de nous faire rêver. Dans cette optique, Pradeep pense que :

« Eric Drexler (Ref.1) has suggested an alternative way of producing things, by assembling things from the bottom, which can be called molecular nanotechnology. This is akin to the humble way in which plants take carbon dioxide and water from the environment to produce organic compounds like carbohydrates in the presence of



sunlight. A vast majority of living beings on this planet subsist on these carbohydrates, excepting a few organisms, which abstract other forms of chemical energy. In fact one carbon CO<sub>2</sub> is assembled by a series of chemical processes to yield complex structures. This one-by-one assembly has facilitated functions with single molecules. Examples of this include molecular motors, muscle fibres, enzymes, etc., each of which is designed to perform a specific activity. The complexity of this molecular architecture is such that one molecule can communicate precisely with another so that the structure, as a whole, achieves unusually complex functions, that are necessary to sustain life. Nature has taken a long time to master this complexity. Maybe, that is the path one must pursue if one has to look toward the future. » (Pradeep, 2008, p. 4).

Cet extrait du texte de Pradeep conforte l'idée selon laquelle les nanotechnologies sont une ouverture vers le futur qui ne s'encombre pas des pesanteurs du passé qu'elles ne font pas que dépasser, mais elles le réinventent en s'installant résolument dans une ingénierie qui devra s'inspirer de la nature et la prendre comme modèle et mentor. En effet, si l'on suit le raisonnement de Pradeep, n'importe quel système organique réalisé par des processus biologiques est extrêmement complexe, mais très peu coûteux en réalité. Il soutient qu'en fait, la composition du jus de melon est plus complexe que le plus complexe des circuits intégrés et pourtant elle est beaucoup moins coûteuse. D'un autre côté, il considère que le pouvoir de manipuler les atomes et de les arranger de la façon qui nous plaît peut faciliter la création de structures inorganiques complexes simplement pour le prix des légumes qui agrémentent nos assiettes. Ainsi, dans la même veine que Drexler, Pradeep conclut de cette analyse que « *This power can, in fact, facilitate the creation of all man-made products.* » (Pradeep, 2008, p. 5). Selon lui, c'est cela même qui caractérise la nanotechnologie et définit sa capacité à recréer la totalité de notre univers artificiel.

Pour l'instant, afin de ne pas trop nous éloigner de notre propos sur l'origine, jetons un regard sur la place de la miniaturisation dans le périple analytique que nous avons entrepris vers cet univers tellement petit que les habitants de l'île de Lilliput eux-mêmes y feraient figure de gigantesques mastodontes.



#### 1.4. Les manifestations supposées des nanos à travers l'histoire et dans la nature

##### 1.4.1. Des nanos dans l'histoire

Afin de minimiser la portée des nanos dans le but de les faire passer pour inoffensives et pas plus dangereuses que les nanoparticules que nous connaissons et respirons déjà ou celles qui existent depuis toujours dans notre environnement, et au moins depuis le Moyen Âge dans certaines technologies telles que la vitrerie ou l'art du verre (McCray<sup>25</sup>, 2005, 179), certains experts, à l'instar de Yan de Kerorguen (2006, p. 137) n'ont pas hésité à faire des nanotechnologies une technologie cinquantenaire<sup>26</sup>, voire plusieurs fois séculaire qui ne fait que resurgir des profondeurs du passé. Comme s'il suffisait d'avoir existé dans le passé ou dès l'origine pour ne pas représenter un danger quelconque ni pour l'humanité, ni pour l'environnement. Avec cette tentative de banalisation du « fait » nanotechnologique, certains chercheurs espèrent mettre fin au débat sur la dangerosité réelle ou supposée des nanos tout autant qu'à celui sur leur acceptabilité. C'est pourquoi il est important de lever le voile sur ces « nanotechnologies » avant la lettre et l'heure afin de comprendre le caractère impertinent du flou que l'on essaie d'introduire subrepticement dans cette nouvelle discipline technoscientifique en formation.

---

<sup>25</sup> McCray se référant à « Barber and Freestone, 'An Investigation' » écrit : « Humans, with varying degrees of intent, have been nanotechnologists for millenia. Ancient artisans have conciously manipulated metal, glass, and ceramic materials to create certain properties. Consider the Lycurgus Cup, a 4<sup>th</sup> century glass vessel in the collection of British Museum. The object's unusual optical properties are cause by a haphazard disperstion of nanometer-sized particles of a gold-silver alloy in a glass matrix. » (McCray, 2005, p. 179). Voir aussi le sous-chapitre 1.4.1. et Fig. 1.4.1.1.).

<sup>26</sup> De Kerorguen (2006, p. 137) soutient avec enthousiasme ce qui suit : « Rien de nouveau sous le soleil ! Cela fait plus d'un demi siècle que physiciens, chimistes et biologistes étudient le comportement de la matière à l'échelle du nanomètre, l'échelle à laquelle évoluent atomes et molécules. Les biologistes qui travaillent spécifiquement sur les enzymes ou les ribosomes sont par la nature même de leur activité les premiers concernés. Tous les spécialistes des molécules peuvent dire qu'ils font de la nanoscience, et cela depuis la révolution de la biologie moléculaire. En fait, les nanosciences ne doivent leur appellation qu'au fait que l'on peut désormais observer et mener des expériences à l'échelle atomique. »

Reprenons la synthèse des éléments historiques en faveur de l'origine ancienne des nanotechnologies telle que Pradeep la présente dans son ouvrage intitulé *Nano : The Essentials*. En essayant de répondre à la question « Quelles sont les principales étapes historiques de la saga de nano ? », il commence par admettre l'existence de beaucoup de formes ou matériaux nanos autour de nous. Selon lui, un des premiers nano-objets connus était fait d'or. Faraday a préparé de l'or colloïdal en 1856 et l'a appelé « métaux divisés » (*divided metals*). Dans le journal du 2 avril 1856, Faraday a nommé les particules qu'il a conçues « l'état divisé de l'or » (*divided state of gold*<sup>27</sup>). La solution qu'il prépara est conservée dans la « Royal Institution ».

L'or métallique, lorsqu'il est divisé en fines particules de tailles variant entre 10 nm et 500 nm, peut être suspendu dans l'eau. En 1890, l'Allemand Robert Knoch, bactériologiste, a constaté que les composés faits avec de l'or inhibent la croissance des bactéries, ce qui lui a valu le prix Nobel de médecine en 1905. L'utilisation de l'or dans les préparations médicinales n'est pas nouvelle. Dans le système indien médical, appelé « *Ayurveda* », l'or est utilisé dans plusieurs préparations. Une préparation populaire appelée « *Sarawatharishtam* » est prescrite pour l'amélioration de la mémoire. L'or est également ajouté dans certaines préparations médicinales pour les bébés, afin d'améliorer leur capacité mentale. Toutes ces préparations utilisent de l'or finement moulu. Le métal a également été utilisé à des fins médicales dans l'Égypte ancienne. De plus, il y a 5.000 ans, les Égyptiens utilisaient l'or en dentisterie. À Alexandrie, les alchimistes ont développé un puissant élixir colloïdal connu sous le nom d'« or liquide », une préparation qui avait pour but de restaurer la jeunesse. Le grand alchimiste et fondateur de la médecine moderne, Paracelse a développé de nombreux traitements très réussis à partir de minerais métalliques, y compris l'or. En Chine, les gens font cuire leur riz avec des pièces d'or afin de reconstituer l'or dans leur corps. L'or colloïdal a été incorporé dans des verres et des vases pour leur donner des couleurs. Le plus ancien d'entre eux est la coupe de Lycurgue (voir figure 1.2, photographie) fabriquée par

<sup>27</sup> <http://personal.bgsu.edu/nberg/faraday/diary2.htm> (accédé, le 27/07/2011).



les Romains au IV<sup>e</sup> siècle. La coupe apparaît en rouge dans la lumière transmise (si une source de lumière est maintenue dans la tasse) et apparaît en vert dans la lumière réfléchie (si la source de lumière est à l'extérieur). L'analyse chimique moderne montre que le verre n'est pas très différent de celui utilisé aujourd'hui. En fait, pour Pradeep, ce qui donne au verre sa couleur c'est qu'il contient de très petites quantités d'or (environ 40 parties par million) et l'argent (environ 300 parties par million) dans la forme de nanoparticules. À côté de ces nanos artificielles, d'autres font état de celles qui ont toujours existé dans la nature.



Figure 1.2 : La coupe de Lycurgue (<http://www.histoiredelantiquite.net/archeologie-romaine/vaisselle-romaine/>)

#### 1.4.2. Des nanos dans la nature

Il convient de reconnaître aussi que la nature crée des nano-objets de différentes sortes. Si l'on en croit le professeur Pradeep, des particules magnétiques ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) de taille nanométrique sont produites par les bactéries, *magnetotacticum Magnetosperillum*. Ces bactéries produisent des particules aux morphologies spécifiques. Pour une bactérie, le magnétisme provoqué par les particules est important puisqu'il l'aide à trouver un sens favorable à sa croissance. Plusieurs

bactéries familières comme le *Lactobacillus* peuvent utiliser des ions métalliques ajoutés au babeurre, qu'elles arrivent à réduire à l'intérieur de la cellule pour produire des nanoparticules. On peut voir, à l'aide d'un microscope électronique à transmission une bactérie *Lactobacillus* unique après une incubation avec des ions d'or pendant plusieurs heures. Les champignons et les virus aussi sont connus pour fabriquer des nanoparticules. Pradeep formulera tout de même une sorte de regret, qui pourrait être perçu comme une réserve, quand il clôt son propos sur le sujet en précisant que, malgré son origine lointaine, cette pratique a été assez marginale dans l'histoire des sciences et techniques. Il constate en effet à son corps défendant que la science des objets nanométriques n'a été abordée que très tardivement (Pradeep, 2008, p. 10). C'est la même question que nous nous posons quant à la pertinence de faire remonter l'origine des nanos aussi loin que ne le font McCray et De Kerorguen.

Dans ce même registre de l'historicité des nanotechnologies, Marc et Daniel Ratner partagent, dans une certaine mesure, les avis de Stéphane Fay et T. Pradeep (2008) que nous venons de citer, et décrivent le processus de miniaturisation qui permet d'obtenir des « nanodots » d'or comme un aspect des activités des artisans du Moyen Âge assimilable aux nanotechnologies actuelles. Ainsi, selon eux, les vitriers de l'époque faisaient de la nanotechnologie sans le savoir. En effet :

Les dernières étapes de découpage du lingot, qui réduisent le cube d'or à l'échelle nanométrique, sont une sorte de nanofabrication ou "manufacture nanométrique". La nanofabrication descendante consiste à construire une nanostructure à partir d'une grande. Inversement, la nanofabrication ascendante consiste à construire une nanostructure à partir d'atomes individuels. Les nanostructures préparées par découpages successifs reçoivent parfois le nom de points quantiques (quantum dots ou nanodots) puisqu'elles ont approximativement la forme d'un point et des diamètres à l'échelle nanométrique.

Ce procédé de fabrication, en particulier le fait de réaliser des nanodots d'or, n'est pas nouveau : les couleurs de certains vitraux d'églises médiévales (à Bourges, par exemple) et le vernissage de certaines poteries anciennes exploitent les propriétés nanométriques des matériaux, qui ne sont pas les mêmes qu'à l'échelle macroscopique. En particulier, les particules d'or de dimension nanométrique peuvent être orange, pourpres, rouges ou verdâtres selon leur taille. Les premiers nanotechnologues de l'histoire sont sans doute les maîtres verriers du Moyen Âge (...), et non ces travailleurs étrangement vêtus qui conçoivent des semi-conducteurs (...) : toutefois, ces verriers ne comprenaient pas pourquoi ni comment le traitement



qu'ils appliquaient à l'or produisait ces couleurs, alors que nous le savons à présent. (Ratner, 2003, p. 14-15).

Compte tenu de ce passé surprenant exhumé par un nombre non négligeable de chercheurs (Roger Moret 2006, p.36 ; Poole et Owens 2003, p. 1), il convient d'analyser les arguments avancés par les tenants d'une telle thèse afin d'examiner le bien-fondé. En effet, comment se peut-il qu'un tel savoir-faire n'ait pas porté dès l'origine le même engouement et les mêmes promesses que les nanotechnologies actuelles dès la découverte du procédé qui le rendait possible ? Cette interrogation, telle que nous l'avons signalée plus haut, rend sujette à caution la réserve émise par Pradeep sur cette question. Le dénouement de cette dernière sera l'objet de notre prochain chapitre. En effet, les enjeux définitionnels et sociétaux sont tels que de la réponse que nous apporterons à cette interrogation dépendra l'opinion que nous nous ferons du caractère révolutionnaire ou non des nanotechnologies ainsi que l'inanité ou non des débats controversés sur sa dangerosité. Certains pro-nanos soutiennent que si la nanotechnologie a existé depuis si longtemps, si la manufacture à l'échelle nanométrique est une pratique qui a traversé l'histoire, alors nous n'avons pas plus de raisons de nous inquiéter du regain d'intérêt autour de cette technologie que nous n'en avons de redouter la place de l'atome dans notre explication du monde après que Démocrite et son maître Leucippe aient inventé l'idée. Nous verrons qu'un tel raisonnement relève de l'imposture plutôt que de la démonstration et qu'il tire une conclusion illégitime des prémisses qu'il avance.

## CHAPITRE II

### DÉFINIR LES NANOTECHNOLOGIES

Dans ce chapitre clé de notre travail, nous allons poser les jalons fondamentaux pour le reste de la thèse que nous défendrons à partir des résultats de la présente enquête. Nos principales positions seront relatives à la critique, voire à la « déconstruction » d'un certain nombre de définitions des « nanotechnologies » souvent biaisées par la prégnance des enjeux qui les in-forment. Du coup, cette rigueur relative des définitions proposées a pour conséquence non négligeable de leur faire manquer leur cible, soit totalement, soit partiellement. En effet, rares sont les spécialistes qui vont tenter de conceptualiser l'idée de nanotechnologies au-delà de la simple description des savoir-faire actuels de la fine pointe de la chimie, de la physique, des biotechnologies, de l'ingénierie ou des sciences de l'information. Ce constat nous conduit à tirer la seule conséquence qui semble s'imposer au vu du déphasage entre les promesses révolutionnaires des nanotechnologies et la continuité dans laquelle s'inscrivent la plupart des pratiques et des méthodes dites « nanotechnologiques » : les nanotechnologies *stricto sensu*, malgré l'inflation qu'a connue ce mot depuis le début des années 2000 en particulier, n'existent pas. En fait, s'il existe vraiment quelque chose que l'on peut nommer « nanotechnologie », elle n'en est qu'à l'état d'enfance ou de balbutiement. En revanche, si par « nanotechnologie » nous voulons désigner le nouveau champ de recherche ouvert par la nouvelle génération d'instruments d'observation qui nous permettent d'appréhender les abîmes de l'infiniment petit, il serait plus rigoureux de parler de « nanotechnoscience » telle que nous proposons de le montrer tout au long de ce chapitre.

Que sont donc les nanotechnologies ? Afin de répondre à cette question, commençons par évoquer, avant d'y revenir plus tard au sous-chapitre 2.2. consacré aux différents types de définition, l'avis du préfacier de Michel Wautelet, colauréat du prix Nobel de chimie 1987, Jean-Marie Lehn, selon qui la course à la miniaturisation est l'une des tendances majeures des sciences et des technologies d'aujourd'hui : faire toujours plus petit est la marotte de nombreux scientifiques et industriels. Les nanotechnologies sont ainsi tenues pour synonymes de miniaturisation. Dans l'optique de cette tendance, souvent présentée comme irréversible, intervient la seconde loi de Gordon Moore (1971) qui la formalise. Selon l'auteur de cette loi, « la taille des transistors installés sur une puce diminue de moitié environ tous les dix-huit mois. Cela signifie que là où on pouvait installer un transistor, on peut en placer mille quinze ans plus tard (ce qui est vérifié). » (Ratner, 2003, p. 20).

Par ailleurs, lors d'une conférence qu'il a donnée le 27 janvier 2000 dans le cadre du Café des Sciences et de la Société du Sicoval, Jean-Marc Lévy-Leblond s'ouvre à son auditoire par la remarque selon laquelle les gens de sa génération auraient vu une transformation radicale de la façon de « faire de la science », y compris de celle d'aborder la science fondamentale qui commençait à coûter cher. Ainsi, dit-il, « les accélérateurs de particules, par exemple, faisaient déjà l'objet d'investissements très importants, mais ils étaient vécus sur le mode d'un investissement potentiel à très long terme : on donne de l'argent, peut-être qu'un jour ça permettra de... » (Lévy-Leblond, 2000, p. 5). Mais, déplore-t-il, aujourd'hui la commande est à très court terme et le couplage entre la commande publique ou privée et le développement scientifique s'opère tellement fortement qu'il est en train d'inhiber fortement ce qui était jusque-là un mouvement que l'on pourrait qualifier, en en forçant un peu les traits, de « libre recherche ». Reconnaisant que la recherche a été, depuis un siècle au moins, tributaire de financements et de contraintes idéologiques ou intellectuelles, Lévy-Leblond n'en regrette pas moins le fait que la commande soit en train d'inhiber une dimension proprement intellectuelle et spéculative de la science. Pour lui, ce qui s'est passé pendant un laps de temps

relativement court est une chose assez étrange qui ne s'était jamais produite dans l'histoire de l'humanité. Il s'agit de la rencontre entre le mouvement de compréhension du monde et celui de sa transformation. Autrement dit, le mariage naguère unimaginable entre le geste philosophique du « je veux comprendre ce qu'est le monde » et le geste technique du « je veux agir sur lui ». Ce tableau dressé par le philosophe français au cours de sa conférence le conduit à admettre le fait que :

Depuis un peu plus d'un siècle, c'est cette rencontre, cette jonction entre la tradition du livre et la tradition de la machine que nous avons connue. Il se trouve maintenant, me semble-t-il, que le contexte économique et politique dans lequel nous vivons a, je le répète, cet effet : l'efficacité technique de la science tend à la recouvrir et à l'inhiber dans sa recherche. À beaucoup d'égards, on pourrait dire que les savoir-faire qu'a permis l'accumulation des savoirs, par une sorte d'effet pervers, deviennent maintenant contre-productifs par rapport à la production des nouveaux savoirs. (Lévy-Leblond, 2000, p. 5-6).

Sans anticiper sur nos conclusions, l'histoire de cette thèse sur les nanotechnologies est *mutatis mutandis* l'histoire de la science que raconte à travers ces lignes Jean-Marc Lévy-Leblond. En plus de ne plus s'identifier à la « science fondamentale », de dépendre des financements et d'être submergée par les commandes qui déterminent son évolution, la science contemporaine est maintenant tributaire de nouvelles idéologies et de nouveaux types d'intérêts, dont nous exposerons quelques-uns, quand nous aborderons le troisième point de ce chapitre qui porte sur les enjeux des définitions des nanotechnologies. Comme le dit si bien Lévy-Leblond, la rencontre entre le « vouloir comprendre » et le « vouloir agir » a produit une sorte de nouvelle science hybride et détournée de ses objectifs initiaux (Lévy-Leblond, 2000, p. 6). Mais, est-il tout à fait juste de parler de contreproductivité scientifique si l'on considère les nanotechnologies comme un aboutissement d'une part de cette science « technomaniaque » qui n'arrive plus à prendre ses distances d'avec la technologie ? La science est-elle dénaturée par la technologie au point d'être totalement éclipsée par celle-ci ? Telles sont les questions qui traverseront en filigrane le présent chapitre. Car, si les nanotechnologies ne sont pas à proprement parler une science, quelle épistémologie pourrait les prendre en charge sans se dédire ni se médire ? Et, si elles sont une



« science » écartelée entre science et technologie, comment le discours épistémologique pourrait-il l'ignorer sans se renier lui-même en tant que discours sur la science ?

Mais auparavant, intéressons-nous à deux démarches à la fois opposées et complémentaires : la miniaturisation et la « monumentalisation », puis à la revue des différents types de définitions que nous avons répertoriés avant de traiter de la question des enjeux qui nous mènera à l'examen du passage du concept de nanotechnologie à celui que nous avons estimé plus approprié de « nanotechnoscience ». Enfin, ce choix appelant une définition, nous clorons notre prochain chapitre en en proposant une.

## 2.1. Miniaturisation vs monumentalisation

Afin de mieux comprendre l'importance de ce point, commençons par exposer le résumé fort à propos qu'en fait John D. Cressler dans son ouvrage *Silicon Earth*. Il y propose de différencier plusieurs termes liés aux nanotechnologies dont on entend souvent parler : le *top-down* et le *bottom-up* notamment. Ces deux expressions, la première en particulier, débouchent sur une version « évolutive » vs « révolutionnaire » des nanotechnologies. Les termes *top-down* et *bottom-up* réfèrent à l'origine à des stratégies de commande de la connaissance et de traitement de l'information, mais ils ont été progressivement appliqués à d'autres domaines des humanités et de la science, y compris aux nanotechnologies. L'approche *top-down* est souvent utilisée comme synonyme de la décomposition d'un système complexe en ses éléments constitutifs (à partir du haut), alors que le *bottom-up* se réfère à la synthèse directe d'un système complexe à partir de ses pièces constitutives (à partir du bas). Ainsi, selon Cressler :

« In a top-down approach, a broad-brushed conceptual view of the complex system is first formulated, specifying but not detailing high-level subsystems. Each layer of the subsystem is then further refined in greater detail, and so forth, until the entire system-level functional specification is reduced to its most basic elements. A

top-down model is typically specified by using "black boxes" that made the decomposition process easier to manipulate and understand. (...)

In a bottom-up approach, on the other hand, the individual basic building blocks of the complex system are first specified in great detail. These building blocks are then linked together to form increasingly larger subsystems, which are in turn linked together, until a complete complex system is realized (this may require many layers of synthesis). This bottom-up strategy often resembles an organic "seed-to-tree" model; it begins small and simple, but rapidly grow in complexity and completeness, hopefully to the correct end result. Clearly nature favors this bottom-up assembly process – it is how we are made after all. » (Cressler, 2009, p. 394-395).

Afin d'étayer les arguments ci-dessus que nous reprenons à notre compte, commençons par examiner le premier point abordé ici par Cressler en y revenant un peu plus en détail, la question de la miniaturisation ou *top-down*.

### 2.1.1. Miniaturisation (*top-down*)

Sans revenir sur ce que nous avons dit au chapitre précédent sur la miniaturisation, notamment à propos des enlumineurs du Moyen Âge et de l'art des miniaturistes européens, il convient de montrer que miniaturiser au sens strict, c'est rendre plus petit, réduire ou concevoir sans altérer ni les fonctions, ni la qualité, ni la nature de l'objet à « cloner ». La miniaturisation, plus qu'une méthode, est presque une marotte pour l'être humain. Elle s'est déclinée sous des formes diverses et a porté sur des cibles différentes destinées à des fonctions multiples et variées qui vont de l'esthétique à l'utilitaire. Le souci de faire de plus en plus petit est d'abord lié à la recherche d'une plus grande efficacité et à des questions d'économie tant en termes d'argent, de temps, d'espace que d'énergie.

Miniaturiser signifie donc réduire jusqu'à la plus petite dimension permise par les lois de la nature, sans altérer ni les fonctionnalités ni les propriétés de ce qui est à miniaturiser. Dès que la barrière quantique est atteinte au point d'empêcher une réplique ou une duplication fidèle, on ne peut plus parler de miniaturisation. Cette dernière peut être tout à fait originale et ne rien devoir à un modèle ou un système de référence quelconque, mais cela ne change rien au principe que nous venons

d'énoncer. C'est-à-dire le processus descendant (*top-down*) et le savoir-faire technologique qui permettent de produire ou de reproduire à très petite échelle un objet ou un système que l'on aurait pu obtenir dans une dimension macro tout en conservant ses propriétés physiques habituelles à l'échelle micro. Ainsi, de la miniaturisation, il n'émerge rien de radicalement nouveau, tout ou presque y est prévisible et répond aux attentes scientifiques et technologiques de l'ingénieur.

Afin d'illustrer notre propos, considérons le fait que de l'horlogerie à la mécanique en passant par l'électronique, l'humain a toujours essayé de rendre portable ou stockable tout ce qui pouvait l'être. Ainsi, certains types d'arbres sont entrés dans les salons grâce à une technique japonaise de jardinage dite *bonsai*, les télévisions, les téléphones, les appareils photographiques et même les caméras tiennent dans une poche de chemise, les cadrans solaires sont passés d'horloges mécaniques à de petites montres électroniques facilement portables et transportables. En vérité, à défaut de remonter à l'*homo sapiens* pour décrire le parcours de la réduction de tout ce qu'on a pu ramener ou représenter à taille humaine, y compris les dieux, nous pouvons attribuer aux Égyptiens et aux Grecs une tendance presque naturelle à miniaturiser qui fera date et qui contribuera à concevoir des mécanismes capables d'apprivoiser le système solaire et plus tard de le mettre littéralement en boîte. Pour étayer notre propos, voilà ce que disent Joachim et Plévert de l'exemple grec :

Les savants grecs ont construit de magnifiques horloges astronomiques, dont la machinerie est constituée de petites roues dentées : ces représentations miniatures du système solaire sont des merveilles de technologie. Plus tard, les progrès dans les mécanismes d'horlogerie vont jouer un rôle essentiel dans la miniaturisation des engins mécaniques qui équiperont les automates, puis les robots. Mais la miniaturisation des machines n'est pas uniquement une histoire de techniques. Elle est indissociable du progrès scientifique. (Joachim et Plévert, 2008, p. 32).

Ainsi, miniaturiser ne constitue pas seulement un progrès technologique, c'est aussi une matérialisation des réussites de la science. En effet, l'histoire scientifiotechnologique regorge d'exemples de mariages réussis entre la science et la technologie. En voici quelques-uns !



En 1764, John Anderson, professeur de physique à l'université de Glasgow, voulait montrer le fonctionnement des pompes à feu ou machines atmosphériques en usage pour le pompage de l'eau des puits des mines de charbon de l'époque. Mais, malheureusement, la copie conforme réduite de la version grandeur nature ne fonctionnait pas. C'est alors qu'Anderson eut recours aux services d'un atelier de réparation d'instruments scientifiques où travaillait James Watt inventeur, ingénieur et mécanicien écossais, connu pour ses travaux sur la machine à vapeur. Celui-ci contribua alors à améliorer la machine à vapeur découverte en 1712 par le Britannique Thomas Newcomen ouvrant ainsi l'ère de la locomotion à moteur à vapeur, celui-ci ayant acquis grâce à Watt une taille qui rendait possible son montage sur un véhicule. Cette prouesse technologique ouvrit aussi l'ère des sciences de la chaleur à l'origine de la thermodynamique (Joachim et Plévert, 2008, p. 33).

La volonté de résoudre certaines incommodités techniques aboutit à l'invention du premier circuit intégré par Jack Kilby en 1958. Comme son nom l'indique, ce type de circuit intègre divers composants électroniques sur un même support. C'est de cette façon que Kilby a réussi à fabriquer un transistor sur de petites plaquettes de germanium ainsi que trois résistances et un condensateur interconnectés par un fil d'or, le tout soudé à la main (Joachim et Plévert, 2008, p. 32 à 38). Mais, ces processus typiques du *top-down* ont des limites objectives que l'Office Parlementaire D'évaluation Des Choix Scientifiques et Technologiques n'a pas manqué de souligner. En effet, dans son compte rendu de l'audition publique du 7 novembre 2006 sur « Les nanotechnologies : risques potentiels, enjeux éthiques », il avançait ce qui suit à propos de la miniaturisation et de ses limites :

Par ailleurs, certains dispositifs macroscopiques simples qui ont fait partie de notre vie quotidienne ne fonctionnent plus à petite échelle. Je vais vous montrer un exemple très simple, c'est ce que j'appelle le paradoxe de Feynman. Il y a une trentaine d'années, avant l'invasion des montres à quartz, il existait des montres que nous appelions automatiques. Celles-ci comprenaient un système avec un ressort spiral et une roue dentée. En secouant son bras, l'agitation aléatoire faisait que la roue ne pouvait tourner que dans un sens : le cliquet l'empêchait en effet de revenir en sens inverse. C'est un dispositif très simple qui représente une fantastique machine à récupérer de l'énergie. Si on miniaturise ce dispositif, il ne peut pas fonctionner. Si tel



était le cas, cela signifierait que l'on enfreint le deuxième principe de la thermodynamique : on ne peut pas totalement transformer un mouvement aléatoire comme l'énergie thermique en énergie mécanique.

Il s'agit là d'une deuxième limitation qui implique qu'il est impossible d'imaginer réduire totalement à l'échelle nanométrique, toutes les fonctionnalités des objets de la vie quotidienne. Cela nous incite à faire montre d'une certaine humilité. La grande majorité des prédictions qu'on peut formuler de façon quelque peu romanesque ne fonctionnera certainement pas, mais des dangers inconnus apparaîtront peut-être<sup>28</sup>.

Cette conscience des limites de la miniaturisation n'aura certainement pas raison de notre volonté de taquiner les profondeurs abyssales du nanoscopique, mais il va nous falloir faire preuve d'ingéniosité. Cependant, même si les questions sur ce que l'on peut faire en bas, la complexité que nous pourrions y introduire, la manière de travailler à l'échelle d'une molécule unique, le nombre d'atomes nécessaires pour construire une machine moléculaire ou un dispositif électronique (élément de mémoire, transistor, calculateur) ont déjà été posées, il n'a jamais été question jusque-là de partir du bas vers le haut au sens où nous l'entendons ici. L'idée de *monumentaliser* était certes connue, mais partir des briques élémentaires de la matière était difficilement envisageable dans ce contexte. Pour utiliser l'expression anglaise qui décrit ce passage du haut vers le bas, le *top-down* a prévalu et s'est imposé en principe directeur, voire en paradigme pour tout progrès technologique significatif, et même scientifique.

Mais, que peut bien être la procédure inverse au *top-down*, la monumentalisation ? C'est la question qui va nous occuper à présent.

### 2.1.2. Monumentalisation (*bottom-up*)

La première chose qui nous vient à l'esprit lorsque nous sommes confrontés au terme « monumentaliser », c'est l'image d'un monument, c'est-à-dire, un édifice relativement imposant dont la fonction peut être décorative ou mémorielle. Les

---

<sup>28</sup> Office Parlementaire D'évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, Compte rendu de l'audition publique, sur « Les nanotechnologies : risques potentiels, enjeux Éthiques » (Paris, 7 novembre 2006).

deux caractéristiques principales d'un monument sont ses ordres de grandeur et sa nature manufacturée, car une montagne, aussi grande fût-elle, n'en est pas un. Il existe différents procédés de fabrication d'un monument dont les deux principaux sont la sculpture et le montage. Dans le cas de la sculpture, le matériau à sculpter peut déjà présenter des proportions très proches de l'objet qui sortira du travail de l'artiste. On peut aussi sculpter les différentes parties d'une œuvre avant de procéder à son assemblage, donc au montage des différentes pièces.

Quant au montage proprement dit, c'est une action qui consiste à mettre ensemble un certain nombre de pièces plus ou moins élémentaires afin d'obtenir quelque chose de plus organisé et de plus grand qui émerge de la composition des éléments constituant le monument, le résultat final de l'assemblage. L'idée de monumentalisation est présentée par Joachim et Plévert comme une démarche *sui generis* à la nanotechnologie au sens strict. Autrement dit, la monumentalisation en est le procédé par excellence de la nanotechnologie. Autant dire qu'on ne peut véritablement faire œuvre de nanotechnologie sans monumentaliser ou que l'on ne peut en produire qu'en monumentalisant. Selon eux, en effet, en permettant la construction de dispositifs qui ne fonctionnent qu'avec une seule molécule ou quelques atomes, la nanotechnologie commence une véritable inversion de la technologie, qui prend à contre-pied notre tendance habituelle à la miniaturisation. Aujourd'hui, ces minuscules dispositifs suscitent l'engouement des scientifiques qui cherchent à en comprendre la nanophysique. La question se pose alors de savoir si l'on peut aller plus loin et s'engager davantage dans une nouvelle voie afin de faire grandir la molécule, augmenter son nombre d'atomes jusqu'à la transformer, par exemple, en une machine à calculer ou une machine mécanique. D'où le nom de *molécules-machines* donné à ces molécules monumentales, et de plus en plus grandes à mesure qu'augmente la complexité de la machine qu'elles incarnent. Ce serait alors la fin des problèmes de miniaturisation ou de la micromécanique. Notre duo d'auteurs décrit alors l'entrée en monumentalisation comme suit :

Pour entrer en « monumentalisation », il faut d'abord déterminer le nombre d'atomes nécessaires au fonctionnement d'une machine comme un moteur, un émetteur-récepteur ou une machine à calculer. Il faut ensuite concevoir cette molécule-machine qui doit être dotée de parties stabilisant sa structure et d'autres assurant une fonction. Il faut enfin imaginer des moyens techniques pour lui transmettre des ordres, de l'énergie ou permettre un échange d'informations. (Joachim et Plévert, 2008, p. 93-94).

Notons que monumentaliser désigne, dans son sens courant, une action dont le résultat peut être obtenu par deux procédés opposés de type *top-down* ou *bottom-up*. On peut dire que l'obtention d'un monument, aussi immense eût-il été, par une action qui consisterait à obtenir quelque chose de plus grand à partir d'un matériau brut encore plus grand relèverait, à strictement parler, de la miniaturisation plutôt que de la monumentalisation. Cependant, on peut considérer que le fait de produire une représentation ou une création qui dépasse en termes de dimension et de proportion l'original ou l'échelle humaine est une forme de monumentalisation, quelle que soit la manière dont ce résultat a pu s'obtenir. En conséquence, la méthode n'est pas toujours déterminante pour produire un objet que l'on peut qualifier de monumental. Dans cette optique, il convient de retenir le caractère quantitatif de ce type de monumentalisation.

Or, dans la perspective qui nous intéresse ici, monumentaliser est une *démarche exclusivement ascendante* dont le principe repose sur l'apport qualitatif que l'on peut obtenir en procédant à des montages et à des modifications à l'échelle moléculaire, voire atomique. De ce point de vue, la monumentalisation aurait quelque chose de la chimie. En outre, en plus de résoudre le problème posé par la barrière quantique, c'est-à-dire la limite objective de l'opérabilité des lois de la physique classique, la monumentalisation ouvre un univers scientficotechnologique insoupçonnable dont on a du mal à imaginer toutes les possibilités dans les différents domaines de la connaissance, de la technologie, de l'art ainsi que les répercussions sociales durables inéluctables que ces bouleversements impliquent.

Monumentaliser en électronique moléculaire, c'est adhérer à une nouvelle électronique totalement intégrée dans une molécule unique ; en mécanique, c'est

adopter l'idée de la réalisation de molécules-machines dont les parties faisant office de dispositifs mécaniques comportent toutes les pièces nécessaires à leur fonctionnement (Joachim et Plévert, 2008, p. 104). Avec la monumentalisation, tout tourne autour de la manipulation et de la maîtrise des atomes et des molécules. Le caractère inouï de cette démarche permet d'envisager des perspectives scientificotechnologiques révolutionnaires totalement inédites. Elle ouvre la porte à beaucoup d'élucubrations à mi-chemin entre l'hypothèse et le fantasme, notamment les molécules à calculer, les molécules à calculer quantiques, les molécules-machines, l'ordinateur quantique, les usines à molécule avec leur lot d'assembleurs, de désassembleurs et de répliqueurs, tel que pressenties et peut-être prédites, par Eric Drexler (2005 – entre fiction et prospective). L'on peut envisager aussi divers autres objets de notre quotidien tels que la bascule, la molécule-brouette, l'inscription de *logo* à caractère nanométrique, dont le premier fut celui d'IBM réalisé par Don Eigler à la fin des années 1980, et bien d'autres prouesses nanotechnologiques sans aucune conséquence pratique sérieuse pour l'instant.

Par contre, de cette manufacture moléculaire, il faut distinguer tout ce qui se rapporte à la science des matériaux et aux recherches sur les nanomatériaux. En effet, ces derniers se rapportent à l'amélioration et à la création de nouveaux matériaux. Le béton, les céramiques, le plastique, le verre, le textile, le fer et les revêtements, entre autres, sont concernés. À la question, « qu'ont-ils vraiment de nano ? » Joachim répond sans ambages que, dans les faits, ils n'ont pas une taille nanométrique et que le terme « nanomatériaux » lui-même a été forgé à partir de l'expression « matériaux structurés à l'échelle nanométrique ». Selon lui, « il désigne les matériaux dont la structure élémentaire est faite de molécules, de macromolécules ou de petits agrégats d'atomes, dont la taille est nanométrique. » (Joachim et Plévert, 2008, p. 116). Ainsi :

La nouveauté présentée par les nanomatériaux par rapport aux matériaux traditionnels se trouve dans la structure chimique du motif de base, qui devient plus complexe. Le champ de recherche des nanomatériaux n'a rien à voir avec celui de la monumentalisation, où la molécule devient machine, alors qu'elle reste une brique élémentaire dans un nanomatériau. Les nanomatériaux constituent un champ de



recherche immense qui justifierait à lui seul un livre entier. Mais il ne s'agit pas de nanotechnologie. (Joachim et Plévert, 2008, p. 116).

Et voilà que c'est dit ! De la même façon que « tout ce qui brille n'est pas de l'or », tout ce qui prétend relever des nanotechnologies n'est pas nanotechnologie. C'est dans cette perspective que John D. Cressler (2009, p. 394-396) considère que la ligne de démarcation entre *top-down* et *bottom-up* est précisément celle qui sépare le paradigme évolutionnaire, caractérisé par la miniaturisation, du paradigme révolutionnaire, caractérisé par ce que nous avons appelé monumentalisation. Pour lui, « *Top-down and bottom-up are used as two different construction paradigms for producing nanoscale materials, devices, and systems.* » (Cressler, 2009, p. 395). En conséquence, la miniaturisation relève du domaine exclusif de la micro-nanoélectronique qui l'applique avec beaucoup de succès. Quant à la monumentalisation, qui s'apparente à ce que Cressler nomme *nanotech synthesis* ou *revolutionary nanotech*, force est de reconnaître qu'elle n'en est qu'à ses balbutiements, mais elle bénéficie d'un intérêt grandissant. Cela dit, nous ne nous étendrons pas outre mesure sur les aspects prospectivistes, voire futuristes des thèses du prophète des nanos, Eric Drexler, c'est pourquoi afin de ne pas trop nous éloigner de notre propos, nous nous appesantirons sur ce qui touche directement la délimitation du concept « nanotechnologie ». En fait, de quelles nanotechnologies parlons-nous ?

Dorénavant, la question qui va nous occuper prioritairement sera d'ordre définitionnel. Puis nous verrons quelques enjeux importants susceptibles d'affecter la multiplicité des définitions afin de nous aider à comprendre quelques-unes des raisons de ce qui ressemble à une « cacophonie définitionnelle ». Ainsi, quels pourraient être les enjeux avoués ou dissimulés autour des nanotechnologies ? Quelles définitions les experts en donnent-ils ? Telles sont les questions auxquelles nous allons essayer d'apporter des réponses dès maintenant.

## 2.2. Revue générale des différents types de définition

### 2.2.1. Examen de quelques définitions

Dans le but de tenter une réponse à la question de la définition que nous ne sommes pas les premiers à nous poser et à laquelle nous ne serons pas les derniers à risquer une réponse, revenons sur ces propos de Jean-Marie Lehn que nous avons évoqués au début de ce chapitre :

L'une des tendances majeures des sciences et des technologies d'aujourd'hui est la course à la miniaturisation. Faire toujours plus petit est le maître mot de nombreux scientifiques et industriels. (Wautelet, 2003, Avant-propos, p. XIII).

Dans la visée ou concomitamment à cette tendance à la miniaturisation tellement irréversible qu'elle a été formalisée par la première loi de Gordon Moore que nous avons évoquée plus tôt, il y a ce que Bernadette Bensaude-Vincent appelle la dématérialisation :

La dématérialisation, étroitement reliée à la miniaturisation et à la progression inexorable de la société d'information, se voit attribuer un statut analogue à celui de la fameuse loi de Moore. Gordon E. Moore, cofondateur de la société Intel, constatant que le nombre de transistors contenu dans un circuit intégré avait doublé tous les 5 – 6 ans depuis 1959, annonce en 1965 et 1971 que la puissance des composants doublerait à taille égale, tous les 18 mois. (Bensaude-Vincent, 2004, p. 13-14).

De ces deux phrases de l'historienne des sciences ressort l'idée que la dématérialisation va de pair avec la miniaturisation qui peut être perçue comme un synonyme des progrès implacables de notre société d'information. Ainsi, dématérialiser davantage devient aussi capital que la loi empirique de Moore<sup>29</sup> pour les progrès constants réalisés par le monde de l'électronique grâce à la

---

<sup>29</sup> Afin de lever l'ambiguïté pendante dans ce passage de Bernadette Bensaude-Vincent, nous renvoyons au chapitre I où nous avons vu que la loi de Moore a évolué entre sa première formulation de 1965 et celle de 1971. L'idée que « la puissance des composants doublerait à taille égale, tous les 18 mois » ne correspond pas tout à fait à la formulation de Gordon Moore qui parle dans sa deuxième prédiction de 1971 du doublement bisannuel du nombre de transistors des microprocesseurs sur une puce de silicium, et non celui de leur puissance, même si l'on pourrait envisager de déduire la puissance des performances rendues possibles par la taille.

miniaturisation depuis le début des années 1960. Cependant, le succès de cette fameuse loi de Moore est tel que certains incondtionnels des nanotechnologies n'ont pas hésité à tenter d'établir une relation déterministe là où il n'y a en fait qu'une relation contingente. De tels amalgames sont de nature à semer la confusion entre ce qui relève du jugement d'existence malicieusement substitué à ce qui relève du jugement de valeur ou de l'appréciation normative.

D'un autre côté, l'une des caractéristiques fondamentales de cette nouvelle technologie est la taille des matériaux sur lesquels nous pouvons désormais avoir prise et que nous pouvons manipuler à une échelle jamais atteinte. C'est pourquoi Lehn définit les nanotechnologies dans les termes suivants : « les nouvelles disciplines qui étudient et manipulent les systèmes à l'échelle des atomes, molécules et au-dessus, à des dimensions comprises entre un nanomètre ( $1\text{nm} = 10^{-9}$ ) et la centaine de nanomètres, sont les *nanotechnologies*. » (Lehn, avant-propos Wautelet 2006, p. XI). On voit bien que cette définition met en exergue la dimension des objets manipulés, leur petite taille jamais atteinte qui leur confère la qualité de « nanotechnologies » et qui leur permet de déterminer la nature des disciplines qui s'y intéressent. Nous allons voir que quand on aborde la question de la définition des nanosciences et des nanotechnologies, plusieurs catégories se dessinent pour se distinguer (« nanotechnologie » et « nanosciences »), se confondre ou s'opposer. Ces nombreuses définitions peuvent être classées en deux principales catégories :

1. Celles qui mettent en avant la base métrique – insistant sur la taille qui définit l'objet ou qui retiennent la poursuite de la miniaturisation à des échelles de plus en plus petites (*top-down*) et dans lesquelles la taille reste fondamentale.
2. Les définitions qui considèrent que la seule nouveauté digne d'intérêt est le passage du bas vers le haut (*bottom up*).

Bien entendu, d'autres définitions tentent de faire la synthèse de l'ensemble de ces points tout en accordant une place plus ou moins importante aux changements de propriétés, comme nous allons le voir.

### 2.2.2. Typologie des définitions

Il faut reconnaître que ce sont les définitions insistant sur la dimension lilliputienne comme caractéristique des activités scientifiotechnologiques affublées du préfixe *nano-* qui sont les plus communes.

#### 2.2.2.1. Les définitions qui misent sur la continuité

S'intéressant à la question préjudiciable de la définition des nanotechnologies, l'Organisation des Nations Unies pour la Science et la Culture (UNESCO), dans son rapport intitulé *Éthique et politique des nanotechnologies*, pose le problème en ces termes :

Comment donc définir les nanotechnologies ? La définition la plus simple et la plus large consiste peut-être à présenter les nanotechnologies comme l'ensemble des recherches menées à l'échelle nanométrique ( $10^{-9}$  m, soit un milliardième de mètre ; à titre de comparaison, un cheveu humain a un diamètre d'environ 20 000 nm). Quelle est la taille de l'échelle nanométrique (...) ? Les molécules, les virus et les atomes mesurent entre moins de 1 nm (atomes) et environ 100 nanomètres (grosses molécules telles que l'ADN). Ils sont trop petits pour être distingués à l'œil nu, ni même au microscope classique, qui utilise le rayonnement visible. (Rapport UNESCO, *Éthique et politique des nanotechnologies*, 2007, p. 5-6).

À titre d'exemple, évoquons brièvement d'autres définitions typiques que nous allons exposer dans leurs grandes lignes avant d'en livrer un modèle de classification. si l'on se réfère à l'analyse de Dominique Vinck, par exemple :

Une première définition consiste à dire que les nanotechnologies sont l'exemple des connaissances et des techniques grâce auxquelles on crée, manipule, visualise et utilise des objets (matériaux ou machines) qui sont de l'ordre du nanomètre. Elles concernent la conception, la caractérisation, la production et les applications de matériaux et de systèmes à cette échelle. (Vinck, 2009, p. 14).



Quant aux nanosciences, l'ethnologue des sciences nous en propose la définition suivante : « Les nanosciences désignent l'étude scientifique des phénomènes et des objets à l'échelle nanométrique, dont les propriétés diffèrent parfois par rapport à ce qui est observé à plus grande échelle. » (Vinck, 2009, p. 14). On voit bien ici que le changement de propriétés n'est qu'accessoire. Ce sur quoi on insiste vraiment est l'ordre de grandeur.

Wautelet, en ce qui le concerne, propose de définir les nanosciences et les nanotechnologies « comme étant les sciences et les technologies des systèmes nanoscopiques. » (Wautelet et al. 2006, p. 5).

Lehn, nous l'avons vu plus haut, définit les nanotechnologies comme toute discipline nouvelle étudiant et manipulant des systèmes à l'échelle atomique, moléculaire, et au-dessus, notamment à des dimensions comprises entre un nanomètre et environ cent.

Dans ces définitions est mise en exergue la dimension des objets manipulés, leur petite taille jamais atteinte, aujourd'hui rendues accessibles par ces technologies de pointe dont nous disposons désormais dans le domaine de l'exploration de l'indéfiniment petit. Autant dire qu'avec ce type de définition, c'est la taille qui fait la nanotechnologie. Cependant, ainsi que nous allons le voir, cette mensuration, qui occupe une place centrale dans ces définitions, est considérée par d'autres comme n'étant pas aussi importante que les processus qui permettent de l'atteindre.

Ces définitions demeurent dans la catégorie des définitions miniaturistes. Dans cette optique, le passage du micro au nano n'est que la suite logique du processus de miniaturisation. C'est dans cette optique que Jean-Louis Pautrat considère la dénomination « nanotechnologie » comme galvaudée et il en tire la conséquence discutable selon laquelle :

Très logiquement, elle désigne les techniques que développe la microélectronique pour se faire toujours plus miniaturisée et parvenir à fabriquer des objets dont les dimensions s'approchent du nanomètre. Par extension, ce vocable recouvre aussi les nombreuses technologies qui bénéficient des procédés mis au point pour la microélectronique, mais sont exploitées dans d'autres domaines scientifiques et techniques, en biologie et en médecine notamment. (Pautrat, 2002, p. 16).

Selon cette approche, « nanotechnologies » rime avec « microtechnologies » et les premières ne sont que l'aboutissement des dernières. Ce qui implique la continuité de nos savoir-faire qui, par une sorte d'évolution naturelle, ont atteint une étape importante dans leur développement, mais non cruciale ni révolutionnaire. Cette vision évolutionniste des nanos, même si elle ne nie pas la manifestation de nouvelles propriétés à cette échelle, ne la considère pas comme fondamentale. En cela, elle tranche avec celle de ceux qui considèrent ce basculement vers la physique quantique des technologies de l'infiniment petit comme capital, voire essentiel pour comprendre le caractère inouï de ce qui se joue autour des nouvelles technologies du lilliputien.

On peut noter également que les définitions citées dans cette partie s'intéressent surtout à la taille de l'objet des nanosciences ou des nanotechnologies qui constitue un enjeu important. Dans cette optique, Vinck (2009) remarque que certains insistent sur toutes les dimensions de l'objet, auquel cas, les nanotechnologies se limiteraient aux nano-objets, nanorobots, nanoparticules dont toutes les dimensions seraient inférieures à 100 nanomètres alors que d'autres considèrent qu'au moins une des dimensions doit s'exprimer en nanomètre. De ce fait, tous les objets qui peuvent mesurer plusieurs microns, millimètres, centimètres ou mètres de long tels que les nanofils ou les nanotubes, et la largeur, à l'instar des couches nanométriques, sont concernés. Ensuite, il y a les cas où ce sont les dimensions d'un élément faisant partie de l'ensemble qui détermine le catalogage nano. L'ethnologue grenoblois donne l'exemple des microsystèmes composés de plusieurs pièces dont certaines sont de dimension nanométrique, à l'instar des microprocesseurs de l'industrie électronique qui sont de l'ordre du centimètre, mais comportent des transistors nanométriques. Cependant, nous allons voir à présent que, par-delà la

taille, les propriétés des nanomatériaux vont prendre une place importante dans les propositions de définition.

#### 2.2.2.2. Les définitions qui insistent sur le changement de propriétés à l'échelle nano

Il est particulièrement important pour les experts qui se focalisent sur les nouvelles propriétés qui émergent de nos nouvelles activités scientifiotechnologiques de souligner, comme le font Mark et Daniel Ratner, le fait que « ce qui est à l'échelle nanométrique n'est pas simplement tout petit, c'est aussi et surtout quelque chose de différent dans la manière d'être tout petit. » (Ratner, 2003, p. 8). En effet, plus que la taille, ce sont les propriétés mêmes de la matière qui changent. Si l'on en croit Michel Wautelet :

Lorsque l'on diminue encore les dimensions pour atteindre le domaine des nanomètres, une autre frontière apparaît. Alors que, au-dessus du micromètre, les propriétés macroscopiques de la matière restent valables, il n'en est plus de même dans le domaine nanométrique. Le nombre d'atomes en surface devient non négligeable vis-à-vis de ceux en volume. Le comportement de la matière donne alors lieu à de nouvelles propriétés physiques, chimiques, voire biologiques. Cette approche dite *top-down* (de haut en bas), permet aussi de concevoir l'extrapolation des méthodes actuelles de la microélectronique à des échelles plus petites. En allant du macroscopique au nanoscopique, on rencontre donc une zone mal définie, entre monde « classique » et « quantique ». C'est le domaine dit de la physique *mésoscopique*, terme apparu vers 1976. Cette physique date de plusieurs décennies, mais son utilité ressort du développement des micro- et des nanotechnologies. L'approche inverse dite *bottom-up* (de bas en haut), permet de comprendre comment aller de l'échelle atomique à l'échelle des nanosystèmes. Lorsque les atomes se regroupent, ils forment des molécules plus ou moins complexes, puis des amas dont les formes évoluent le plus souvent vers un polyèdre. Lorsque l'amas compte plusieurs centaines d'atomes, voire plus, on obtient des nanoparticules qui peuvent croître jusqu'à des dimensions de l'ordre du micromètre. (Wautelet, 2003, p. 6).

Mais, Wautelet nous rappelle qu'à l'échelle atomique ou moléculaire, la physique classique n'est plus suffisante pour comprendre les propriétés de ces particules. Il faut faire appel à la mécanique quantique. C'est, selon lui, l'un des aspects des nanotechnologies qui rend leur étude à la fois intéressante, déroutante (notamment pour les ingénieurs) et difficile... En effet, les chimistes théoriciens savent depuis longtemps calculer les propriétés des molécules dans le cadre de la chimie

quantique. Mais cela exige des ordinateurs puissants à cause de la longueur et de la complexité des calculs. C'est la raison pour laquelle, plus le nombre d'atomes est grand, plus les ordinateurs doivent être puissants. Cette difficulté croissante arrimée à la quantité des atomes fait dire à Wautelet que « calculer les propriétés des nanoparticules comportant plusieurs centaines d'atomes est impossible. » (Wautelet, 2003, p. 6-7). Au vu de cette analyse, s'il y a quelque chose de vraiment « révolutionnaire » dans les nanotechnologies, ce sont les nouvelles propriétés de la matière à l'échelle du nanomètre qui sont à l'origine d'une redéfinition des frontières entre sciences et technologies ainsi que de la recomposition des communautés scientifiques qui ne sont plus structurées selon des spécialisations rigides et opaques, mais qui collaborent et interagissent toutes ensemble.

Nous verrons ci-après que l'adoption du changement de propriétés comme quelque chose d'essentiel dans la définition des nanos implique l'avènement d'autres méthodes telles que les technologies de composition ou de recomposition des dispositifs du bas vers le haut, communément appelée *bottom up*. Cette démarche consiste à partir des briques élémentaires de la matière pour reproduire ou créer un nouveau matériau ou un nouveau système. Dans cette optique, tout se joue entre les niveaux atomiques et moléculaires.

#### 2.2.2.3. Les définitions qui retiennent l'aspect ingénierie à l'échelle nanométrique

Même si l'aspect métrique ne disparaît pas de ces définitions, il n'est évoqué que pour souligner notre capacité à manipuler des objets à cette échelle. Eric Drexler, malgré la controverse qu'il a suscitée par son ouvrage qui se voulait plus prospectif qu'utopique, *Engins de création*, prédit que « la nouvelle technologie manipulera les atomes et les molécules individuellement en les contrôlant avec précision ; appelons-la technologie moléculaire. Elle va changer le monde bien plus que nous ne pouvons l'imaginer. » (Drexler, 2005, p. 5). En tout cas, l'importance des



changements annoncés est telle que certains n'hésitent pas à franchir le cap des superlatifs pour évoquer franchement une révolution scientifique ou industrielle. C'est le cas de Mark et Daniel Ratner qui parlent déjà de *la révolution de demain* sous-titre de l'ouvrage qu'ils ont écrit sur les nanotechnologies. Ils annonçaient même la révision de tous les principes fondamentaux utilisés dans la fabrication des puces ce qui les ferait passer des micropuces aux nanopuces, d'ici quelques années (délais initialement fixés par certains experts pour 2010). « Pour la première fois, soutiennent-ils, depuis que Moore a établi ses lois, la conception des puces électroniques devra vivre une révolution, et non plus suivre une évolution. » (Ratner, 2003, p. 21). Ceci sous-entend que même si nous sommes dans une logique évolutionniste très importante, cette évolution nous mènera tout droit vers une rupture dont l'avènement est imminent. Louis Laurent et Jean-Claude Petit parlent d'« une évolution scientifique et technologique majeure » (Laurent et Petit, 2005, p. 5).

D'un autre côté, au Canada, le Conseil de la Science et de la Technologie, dans son avis intitulé « Nanotechnologie : la maîtrise de l'infiniment petit » adressé au gouvernement du Québec en 2001, propose la définition ci-dessous :

On définit les nanotechnologies comme étant la création et l'utilisation de matériaux, d'instruments et de systèmes portant sur la matière de l'ordre de 1 à 100 nanomètres, c'est-à-dire de celui des atomes, des molécules et des structures supramoléculaires. Un nanomètre (nm) est une unité de mesure qui correspond à un milliardième de mètre (soit  $10^{-9}$  mètre)<sup>30</sup>.

Cette définition est plutôt nuancée, même si elle met en exergue l'aspect technologique. En revanche, si l'on prend la définition admise par Michael Crichton dans l'introduction de son roman-fiction *La proie*, « elles [les nanotechnologies] s'intéressent à la construction de machines d'une taille infiniment petite, de l'ordre de cent nanomètres, soit cent milliardième de mètre, et donc environ mille fois plus petites que le diamètre d'un cheveu. » (Crichton, 2003, p. 11-12).

---

<sup>30</sup> <http://www.cst.gouv.qc.ca> [consulté le 3 avril 2011].

Pour la Royal Society britannique, « *nanotechnologies are the design, characterisation, production and application of structures, devices and systems by controlling shape and size at nanometre scale*<sup>31</sup>. » (Royal Society, 2004, p. 5).

Même la définition officielle recommandée par les Ratner relève de celles qui mettent l'accent sur les changements de propriétés et la dimension technologique. Selon eux :

Une bonne définition des nanosciences et des nanotechnologies, tenant compte des propriétés spécifiques de l'échelle nanométrique, a été donnée par la *National Science Foundation* dans un texte publié par Mike Roco en 2001 : Le nanomètre (un milliardième de mètre) est un point magique de l'échelle des dimensions. Les nanostructures se situent entre ce que l'homme peut fabriquer de plus petit et les plus grandes molécules du monde vivant. À ce point, les sciences de l'ingénierie de l'échelle nanométrique se réfèrent aux avancées technologiques issues de l'exploitation des propriétés chimiques, physiques et biologiques des systèmes dont la taille est intermédiaire entre celle des atomes ou des molécules isolées, et celle des matériaux macroscopiques : entre ces deux limites, les propriétés traditionnelles peuvent être contrôlées. (Ratner, 2003, p. 8-9).

Nous verrons que la question du contrôle, évoquée ici, est capitale tant pour la science que pour les nanotechnologies. Quant à Jean-Louis Pautrat, autant que nous, il se pose la question de la pertinence de la création d'un nouveau concept pour désigner une pratique pas tout à fait révolutionnaire dans la préface qu'il a accordée à l'ouvrage collectif sur les nanosciences dirigé par Marcel Lahmani. Il écrit :

Les nanosciences et les nanotechnologies se déclinent dans tous les secteurs de la connaissance. Fallait-il créer une nouvelle catégorie alors que les sciences physiques, chimiques et maintenant biologiques, sont depuis bien longtemps attachées à la compréhension des phénomènes jusqu'à la dimension la plus ultime ? (Pautrat, préface de Lahmani, 2006, p.17).

---

<sup>31</sup> Traduction de Jean-Marie Lehn : « Les « nanotechnologies » sont la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, dispositifs et systèmes par contrôle de la forme et de la taille à l'échelle nanométrique. », avant-propos à l'ouvrage de Michel Wautelet et coll., *Les nanotechnologies*, 2<sup>e</sup> éditions Dunod, 2006 [2003 pour la 1<sup>ère</sup>], p. XI. Voir aussi le rapport « Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties », *The royal society & the Royal Academy of Engineering Nanoscience and Nanotechnologies*, juillet 2004, p. 5.

Ainsi, à son avis, ces appellations (nanosciences et nanotechnologies), loin de désigner un nouveau chapitre des sciences, doivent être comprises comme une nouvelle grille de lecture des disciplines scientifiques, une nouvelle façon d'aborder des chapitres traditionnels de la science. Car, pour lui, le nanomètre, défini de longue date (depuis les années 1960 – voir chapitre I), renvoie à une grandeur, le milliardième de mètre ou le millième de micron, voisin de la distance entre deux atomes dans un solide (quelques dixièmes de nanomètres). C'est pourquoi il considère que ce qui est nouveau, c'est l'aptitude à façonner la matière jusqu'à avoisiner le nanomètre. Pour lui, c'est ce nouveau savoir-faire, cette technologie, qui a tout naturellement reçu l'appellation de nanotechnologie. Ainsi, la fabrication d'objets aussi petits a ouvert un champ à l'investigation scientifique. En effet, les nouveaux moyens d'observation développés simultanément ont permis de faire de notions abstraites, comme la fonction d'onde électronique, l'« image » d'un atome et la présence d'un seul électron, des objets d'observation de tous les jours. Cette familiarité nouvelle est bien de nature à stimuler un engouement pour les sciences qui en bénéficient.

En plus de ces apports technologiques inouïs, Jean-Louis Pautrat reconnaît aussi une conséquence méthodologique déterminante pour la définition du concept. Selon son analyse :

Une succession d'allers et retours fructueux s'est ainsi développée entre la fabrication d'échantillons toujours plus petits et mieux contrôlés et la compréhension de leurs propriétés. Ces allers-retours sont sous-tendus par la question suivante : à quel moment la physique que nous connaissons, la physique du macroscopique, ne s'applique-t-elle plus ? La réponse est venue sous la forme d'un nouveau champ de la physique, la physique mésoscopique ou physique des dimensions intermédiaires, qui, bien entendu, n'est qu'une des multiples facettes des nanosciences. Vouloir délimiter précisément le champ des nanosciences c'est chercher à détecter la taille où les petites dimensions d'un échantillon deviennent primordiales pour expliquer ses propriétés, c'est en quelque sorte, en rechercher la frontière. Cette limite sera plus ou moins éloignée selon que l'on s'intéresse à l'une ou l'autre des propriétés du matériau : états électroniques, transport électronique, magnétisme, propagation de la lumière ou d'autres encore. En règle générale c'est la comparaison de la dimension de l'échantillon avec les longueurs caractéristiques des divers phénomènes (libres parcours moyens de l'électron, longueur d'onde électronique de la lumière...) qui devient le critère de définition de la frontière des nanosciences. Ce critère multiforme

renvoie déjà aux multiples domaines auxquels devront s'intéresser les nanosciences. (Pautrat, préface de Lahmani, 2006, p. 17-18).

Un des précurseurs du domaine, co-inventeur du microscope à effet tunnel, Heinrich Rohrer, nous fournit une autre définition des nanosciences centrée sur les objets étudiés : « La nanoscience est la science qui traite des nano-objets individualisés : mesurer, comprendre, modifier sélectivement les propriétés, manipuler, positionner et usiner de tels objets ; développer de nouveaux concepts pour traiter ces nano-objets et tout spécialement une grande collection d'entre eux<sup>32</sup>. » (Rohrer, H., « The nanoworld: chances and challenges », in *Proc. Of Intl. Conf. On Nanophase Chemistry Houston USA*, 23-24 Oct. 1995). Selon Pautrat, cette définition a le mérite de faire apparaître combien les méthodes de fabrication et les instruments d'observation seront au cœur du sujet. Nous reviendrons sur ces aspects de la question quand nous aborderons le dernier point de ce chapitre. En revanche, on peut considérer que la prolifération des définitions rend bien compte du caractère indéfini du concept de « nanotechnologies ». Aussi, après avoir noté que l'essentiel des désaccords porte sur les frontières du domaine, Vinck fait la présente analyse qui nous conforte dans la conviction qu'on ne peut pas négliger la question qui nous préoccupe ici et qui consiste à vouloir exorciser l'indéfinissabilité :

Quand on parle d'un objet nanométrique, de quoi s'agit-il ? Seulement des objets mesurant environ quelques nanomètres ou ceux mesurant maximum quelques nanomètres ? Dans ce cas, il faut considérer que chimistes, physiciens et biologistes font déjà des nanosciences depuis longtemps. Les physiciens, dans le domaine nucléaire, travaillent sur les atomes depuis plus de cinquante ans, les chimistes depuis plus d'un siècle – en catalyse, pharmacochimie et chimie des polymères. De même pour les biologistes qui étudient les virus ou les interactions entre la cellule et son environnement. (Vinck, 2009, p. 15).

Mais, pourquoi créer un nouveau concept pour désigner une nouvelle discipline scientifique si dans les faits rien ne justifie une telle surenchère conceptuelle ? Nous pouvons dire sans équivoque que si les nanos correspondent à quelque chose qui

---

<sup>32</sup> H. Rohrer a reçu en 1986, avec G. Binnig, le prix Nobel de physique pour l'invention du microscope à effet tunnel.



existait auparavant, alors elles ne sauraient mériter l'intérêt qu'on leur prête aujourd'hui puisqu'elles s'inscriraient dans une continuité presque ordinaire, une évolution normale et presque naturelle des choses.

Puis, on peut noter un autre type de définition qui ne tient pas compte des dimensions extérieures des objets, mais plutôt du degré de précision lors de sa fabrication. Dans le cas d'espèce, ne compte que la précision de l'ordre du nanomètre avec laquelle les dimensions de l'objet ou son maillage interne sont réalisés par les instruments appropriés. Enfin, il y a celles qui intègrent la structuration « au hasard » dans la masse d'un matériau comme l'inclusion de nano-objets ou de nanofils pour le renforcer, notamment dans les raquettes et les pneus. Selon Vinck, on parle alors de nanomatériaux, même si « cette définition est également ambiguë, car quasiment tous les matériaux (ciment, métaux, bois...) sont, naturellement ou pas, nanostructurés. » (Vinck, 2009, p. 17). Du coup, l'auteur tire la présente conséquence qui motive notre contribution à cette réflexion en problématisant très clairement la question :

Les nanotechnologies, oui, sont donc bien des technologies de l'infiniment petit, mais derrière cette définition englobante se cachent des choses très différentes les unes des autres. Les experts, soucieux de ne pas tout mélanger, construisent alors des définitions plus précises, mais ils ne s'accordent pas entre eux sur ces définitions, même quand il s'agit de préciser la taille des objets « nanos ». (Vinck. 2009, p. 17).

Bien entendu, nous n'avons pas la prétention de réussir là où la plupart des experts ont échoué, mais nous comptons bien poser les jalons d'une définition descriptivo-normative qui tienne compte des caractéristiques fondamentales des nanos. Cependant, la liste des types de définitions que nous avons annoncée n'étant pas encore achevée, voyons à présent celles qui privilégient la démarche ascendante.

#### 2.2.2.4. Les définitions qui considèrent que le passage du bas vers le haut (*bottom-up*) est la seule nouveauté digne d'intérêt

Ce type de définition est le moins populaire de tous. Il est assumé par très peu de scientifiques, dont Christian Joachim qui soutient qu'« en inversant la technologie de fabrication, la nanotechnologie permet d'écrire un nouveau livre, où chaque montage d'alors est remplacé par une seule molécule, qui devient à la fois le dispositif expérimental et l'objet de l'expérience. » (Joachim et Plévert, 2008, p. 97).

C'est pourquoi il ne faut pas confondre physique mésoscopique et nanophysique. En effet, la physique mésoscopique étudie les dispositifs dont les dimensions sont comprises entre quelques dizaines et quelques centaines de nanomètres. Il s'agit de phénomènes ou d'objets, constitués de millions d'atomes, dont l'échelle est située entre l'atomique et le macroscopique. Cet état de fait amène Joachim à préciser qu'en physique mésoscopique, les ondes quantiques associées aux électrons sont encore brouillées. Mais, dans les petites échelles, contrairement aux dispositifs plus massifs, l'un des facteurs de brouillage disparaît. Selon l'explication donnée par Joachim :

(...) quand la taille du dispositif devient inférieure au libre parcours moyen des électrons (la distance qu'ils parcourent entre deux collisions), la probabilité de collision avec les vibrations des atomes chute, comme si les électrons n'avaient plus le temps d'interagir avec elles. Les vibrations n'interviennent donc presque plus et tout se passe alors comme si une seule onde était associée à un grand nombre d'électrons à la fois, comme si une note émergeait enfin du charivari de l'orchestre, à force de tenter d'accorder les instruments. (Joachim et Plévert, 2008, p. 51-52).

C'est la raison pour laquelle il ne faut pas confondre la physique mésoscopique et la nanophysique. Selon lui, « La nanophysique traite de la physique des dispositifs ne comprenant que quelques dizaines d'atomes et où le brouillage des ondes quantiques est absent ou contrôlé (ou encore introduit par l'environnement extérieur). » (Joachim et Plévert, 2008, p. 53). Mais, il reconnaît toutefois le caractère problématique de la délimitation des deux domaines à cause de la nature des frontières qu'il juge enclin à générer des conflits entre les communautés

scientifiques. C'est ainsi qu'une interprétation inversée du concept de nanophysique peut être proposée, selon que l'on est « miniaturiste » ou « monumentaliste ».

Pour les adeptes de l'approche descendante qui utilisent des techniques de miniaturisation de la microélectronique pour faire de la physique mésoscopique, la nanophysique commence quand les propriétés quantiques émergent. Pour ceux qui pratiquent une approche ascendante et manipulent les atomes à l'unité, la nanophysique commence quand les atomes participant au dispositif peuvent être comptés un par un et s'arrête quand ils sont trop nombreux et qu'ils créent les premiers brouillages internes non maîtrisables des phénomènes quantiques. (Joachim et Plévert, 2008, p. 53-54).

Autrement dit, on peut entrer en nanotechnologie par le haut ou par le bas, l'essentiel étant d'aller à la rencontre des propriétés quantiques et d'être confronté aux atomes individuellement. Du coup, le critère de démarcation préconisé ici par Joachim est la perte de contrôle provoquée par les phénomènes quantiques. Cette position est celle qui se rapproche le plus de notre conception des nanotechnologies en tant que « nanotechnosciences ». Elle nous paraît la plus fidèle à l'idée de rupture et de nouveauté radicale dans l'ordre des sciences et technologies. Mais, nous savons que la question de la prolifération des définitions autour des nanotechnologies est intrinsèquement liée à la problématique des enjeux que nous nous proposons d'examiner à présent afin d'y voir plus clair.

### 2.3. La question des enjeux au cœur des définitions

La question des enjeux est centrale pour comprendre la prolifération des définitions ainsi que leur étonnante diversité. L'absence de consensus autour d'une définition des nanotechnologies est diversement interprétée, mais jamais condamnée. L'une des raisons de cette indulgence pourrait être le fait que certains pensent que l'on navigue en terrain inconnu et que de toute façon les nanotechnologies ne sont qu'à l'étape de l'enfance. En conséquence, la détermination d'une nature stable aux

contours plus précis prendra un certain temps si ce n'est un temps certain. Mais, pour l'instant, l'examen des définitions proposées par les experts révèle des préoccupations hétéroclites, parfois incompatibles. Nous allons en examiner quelques-unes afin de mettre en évidence les raisons de l'engouement subit autour du préfixe *nano*, mais aussi pour expliquer le déplacement des stratégies de recherche de budgets de laboratoires sur le terrain de la définition même du champ des nanos.

### 2.3.1. Les enjeux de la course aux nanos

Pour comprendre les grands enjeux de la course aux nanotechnologies et l'engouement qu'elles suscitent, nous allons nous focaliser sur l'exemple des États-Unis, tête de proue de la Recherche & Développement sur les nanotechnologies, à travers les conclusions de la *National Nanotechnology Initiative (NNI)* dont la mission explicite est d'impulser le développement des nanotechnologies afin d'accélérer le développement de la recherche fondamentale dans les sciences et les ingénieries à l'échelle du nanomètre pour créer la base du savoir nécessaire à la production commerciale future. Les résultats attendus sont considérables dans des secteurs tels que l'industrie, la médecine et la prévention sanitaire, l'environnement et l'énergie, la biotechnologie et la sécurité nationale ou l'armée. C'est pourquoi quand certains avancent que les nanotechnologies vont contribuer à la paix mondiale, il y a de quoi se poser des questions. Le rapport, issu des ateliers organisés par la *National Science Foundation (NSF)* les 28 et 29 septembre 2000 sur la demande de la *National Science and Technology Council*, du *Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology (NSET)*, est assez clair à ce sujet. Il soutient, en effet, ce qui suit :

The NNI will accelerate the pace of fundamental research in nanoscale science and engineering, creating the knowledge and providing the manufacturing science base needed for future commercial production. Potential breakthroughs are possible in areas such as materials and manufacturing, medicine and healthcare, environment and energy, biotechnology and national security. (Roco et Bainbridge, 2001, p. 2).



Si l'on en croit Messieurs Mihail C. Roco et William Sims Bainbridge, une telle ambition se justifie par quelques promesses :

Advances in nanoscience and nanotechnology promise to have major implications for health, wealth, and peace in the upcoming decades. Knowledge in this field is growing worldwide, leading to fundamental scientific advances. In turn, this will lead to dramatic changes in the ways that material devices, and systems are understood and created. (Roco and Bainbridge, 2001, Executive summary, p. v).

On voit bien à travers ce qui est mis en avant dans cet extrait que les implications annoncées sont d'abord d'ordre sanitaire, puis économique et enfin sécuritaire. Mais comme nous aurons l'occasion de le voir, les préoccupations liées à la santé vont vite déboucher sur des considérations économiques et « transhumanistes », voire posthumanistes, du nom de la « métaphysique » qui accompagne l'évolution de cette science émergente. De même, quand on parle de prospérité ou de richesse, on est en droit de se demander à qui vont profiter cette prospérité et ses richesses et aux dépens de qui elles s'acquerront. Peut-on sérieusement envisager qu'une science ou une technologie quelconque, fut-elle révolutionnaire, résolve des problèmes qui relèvent proprement de la condition humaine actuelle, voire de sa nature profonde et d'un système économique mondial qui privilégie la productivité ? Force est de constater la primauté de la rentabilité et la solvabilité au détriment de la solidarité, de l'échange équitable et de la confiance en l'humain. Quant à l'implication des nanotechnologies dans l'instauration de la paix, on peut se demander comment la mise au point de matériels militaires ultrasophistiqués peut contribuer à une telle utopie. À moins de considérer que la paix soit un état de fait où les plus forts dominant et continuent de dominer et où les plus faibles se soumettent et continuent de se soumettre aux quatre volontés des premiers. Avec les nanotechnologies une question presque aussi vieille que la philosophie se pose avec acuité, celle de l'anneau de Gygès, exposée par Platon dans la *République*. Si l'on se réfère au mythe évoqué par le Maître de l'Académie, la question est de savoir quel usage sera fait de cet « anneau » que pourrait constituer la maîtrise des nanotechnologies dont le pouvoir serait potentiellement immense ; mais celles-ci présentent la caractéristique non négligeable de ne pas être uniques, puisque

développées aux quatre coins du monde, et l'optimisation de leurs propriétés potentielles pourrait remettre en cause les équilibres, tant géopolitiques que socio-économiques. Il faudra noter enfin le fait que la visée purement scientifique des nanotechnologies, c'est-à-dire sa dimension de compréhension et d'explication des phénomènes, est réduite à un niveau accessoire, voire dérisoire, malgré le fait qu'elle reste un préalable vers la réalisation des objectifs de pouvoir très clairement formulée. De ce point de vue, la course aux nanotechnologies pourrait être comparée à la course aux armements, même si les enjeux ne sauraient se limiter à cet aspect de la question qui n'est qu'un élément parmi d'autres, mais le moins négligeable de tous, convenons-en.

Cependant, les textes rapportés par Roco et Bainbridge, dans l'ouvrage intitulé *Societal implications of Nanoscience and Nanotechnology* qu'ils ont édité conjointement, mettent bien en évidence cette primauté de la connaissance sur ses implications, même si le résultat reste le même, bien entendu. C'est-à-dire une instrumentalisation de la science mise au service de la technologie, au bénéfice presque exclusif de la politique et de l'économie. Selon ce texte :

Nanoscale science and engineering will lead to better understanding of nature; advances in fundamental research and education and significant changes in industrial manufacturing, the economy; healthcare, and environmental management and sustainability. Examples of the promise of nanotechnology, with projected total worldwide market size of over \$ 1 trillion annually in 10 to 15 years (...). (Roco and Bainbridge, 2001, p. 3).

Comme nous pouvons le voir, la perspective d'une meilleure compréhension de la nature est toujours envisagée avec l'espoir qu'elle va décupler la productivité industrielle et partant, l'économie, la santé, l'environnement ainsi que la portée du développement durable.

Dans le domaine de l'*électronique*, les nanotechnologies sont censées apporter une plus-value d'environ 300 milliards de dollars par an à la production industrielle en ce qui concerne les semiconducteurs et à peu près le même montant surtout pour la vente des circuits intégrés dans les 10 à 15 prochaines années.

Pour ce qui est de l'*industrie*, l'échelle du nanomètre est censée y devenir extrêmement rentable et optimale dès que les nanosciences auront fourni la connaissance nécessaire d'un côté et que la nanoingénierie aura développé les outils adéquats de l'autre. Des matériaux avec une performance élevée, des propriétés et des fonctions uniques seront produits, ce que la chimie traditionnelle ne pourrait pas créer. Selon une communication confidentielle de l'Institut de recherche d'Hitachi (*Hitachi Research Institute*), les matériaux et processus nanostructurés sont supposés augmenter leur impact sur le marché d'environ 340 milliards de dollars par an dans les 10 prochaines années.

En ce qui concerne les *soins médicaux*, on pense que le développement des nanotechnologies va aider à prolonger la durée de la vie, à améliorer sa qualité, et à étendre les capacités physiques de l'humain. Quant à la *pharmacie*, plus de la moitié de la production pharmaceutique sera dépendante des nanotechnologies et rapportera plus de 180 milliards de dollars par an dans les 10 à 15 prochaines années. Pour ce qui est des *usines chimiques*, les catalyseurs nanostructurés ont des applications dans les traitements industriels, avec un impact évalué à 100 milliards de dollars dans les 10 à 15 ans à venir, sachant que l'on estime un taux de croissance historique d'environ 10% depuis 1999 où cette activité avait rapporté 30 milliards de dollars.

Dans les transports, les nanomatériaux et la nanoélectronique permettront la conception de véhicules plus légers, plus rapides, plus sûrs, plus fiables, et plus résistants. Ainsi que des routes, des ponts, des autoroutes, des pipelines et des rails plus rentables. Les nanotechnologies permettent d'envisager la valeur du marché annuel des produits aérospatiaux autour de 70 milliards de dollars dans les dix prochaines années.

Enfin, sur le *développement durable*, les nanotechnologies sont supposées améliorer la production agricole pour une population mondiale grandissante,

pourvoir aux besoins en eau accessible et faciliter la désalinisation à bas coûts. Elles sont, aussi, censées rendre possible la vulgarisation des énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire par une conversion extrêmement efficace. Elles contribueront à la réduction de l'exploitation des matériaux rares et la diminution de la pollution pour un environnement plus sain. Par exemple, pour les 10 à 15 ans à venir, les projections indiquent que les nanotechnologies ont le potentiel de réduire la consommation mondiale d'énergie de plus de 10% épargnant ainsi 10 milliards de dollars par an et une réduction correspondant à 200 millions de tonnes d'émission de carbone par an. (Roco and Bainbridge, 2001, p. 3-4).

Comme nous pouvons nous en rendre compte, les nanotechnologies représentent un enjeu majeur pour la science, les technologies, l'environnement, ainsi que les équilibres sociopolitiques mondiaux. Mais la grande question qui subsiste est celle de la crédibilité de telles prévisions quand on sait que de l'aveu même des acteurs américains les nanotechnologies sont encore à l'état d'enfance et que seules des nanostructures rudimentaires peuvent être créées avec un minimum de contrôle même si la révolution annoncée dans ce domaine emporte l'adhésion de la plupart des spécialistes. (Roco and Bainbridge, 2001, p. 5). Cette caractéristique actuelle des nanotechnologies qui n'en sont qu'à leurs balbutiements constitue une des raisons de la polysémie définitionnelle. Voyons maintenant les autres catégories d'enjeux qui contribuent au brouillage des pistes pouvant mener à une définition consensuelle.

### 2.3.2. Problèmes de définition des nanotechnologies : autres enjeux

En parcourant les textes de plus en plus nombreux traitant des nanotechnologies, il est aisé de se rendre compte qu'il règne sur cette question, comme qui dirait, une cacophonie définitionnelle. Si l'on en croit Dominique Vinck, la raison d'une telle cacophonie est liée aux enjeux qui varient en fonction des intérêts des nombreux acteurs issus de domaines divers et variés. Selon lui, « La situation est compliquée effectivement, parce que les acteurs – chercheurs, institutions et entreprises



notamment – ne sont pas d'accord entre eux sur ce qu'il convient d'inclure ou pas dans le domaine des nanotechnologies. Ils n'ont pas le même point de vue. » (Vinck, 2009, p. 19).

Ce constat symptomatique d'une difficulté majeure, voire d'une tare, nous amène, à l'instar de Vinck (2009, p. 21 et 22, notamment), à nous interroger sur la pertinence de laisser cette question de la définition à la discrétion exclusive des acteurs. On est en droit de se demander si une définition potentiellement objective peut émerger de la tête de ceux qui ont des intérêts non dissimulés, lesquels excèdent souvent le cadre académique. Compte tenu de l'importance des montants en jeu autour du développement des technologies nanos (alors qu'il était de 1,081 milliard de dollars en 2005, il a atteint 1,775 milliard en 2006, aux États-Unis), on doit s'interroger sur l'identité des spécialistes qui définissent cette activité connue sous le nom de « nanotechnologies ». Autrement dit, qui parle ? Il se trouve que chercheurs, institutions et entreprises n'ont pas les mêmes intérêts, donc pas les mêmes motivations en ce qui concerne les nanos. Si les chercheurs s'appliquent encore plus ou moins à faire reculer les frontières de notre ignorance tout en essayant de s'attirer les faveurs des bailleurs, les institutions sont obligées de tenir compte de leurs possibilités financières et des retombées économiques et sociétales, alors que les entreprises ne sont motivées que par l'optimisation des profits possibles à travers chaque début d'innovation. Cette situation entraîne des conflits d'intérêts majeurs entre ces trois parties pourtant condamnées par la force des nanos à collaborer.

C'est cette situation que résume l'expert, Sylvain C. (un des répondants de Lafontaine au nom fictif pour les besoins de l'anonymat) dans l'étude menée par la sociologue de l'Université de Montréal, quand il témoigne :

J'étais dans l'industrie pharmaceutique aux États-Unis au moment où les conseils d'administration et les directions d'entreprises composés de scientifiques, dont la mentalité était de faire des découvertes pour aider les gens à améliorer leur santé, ont été remplacés par des conseils d'administration qui ont changé de philosophie [...]. Ce qui est important, ce n'est pas de soigner ou de guérir des malades ; ce qui est important, c'est d'obtenir du rendement pour les actionnaires. (Lafontaine, 2010, p. 113-114).

On peut comprendre dans une telle configuration d'acteurs que la recherche puisse être orientée selon la volonté et les intérêts des bailleurs qui la financent et qui en fixent les objectifs. Une telle mainmise du pouvoir économique, en plus d'avoir des répercussions sur la question de la définition, pose des problèmes d'ordre épistémologique et éthique. On peut soupçonner que cette omniprésence des acteurs non scientifiques au cœur même de la politique scientifique leur permet d'orienter et de manipuler à souhait le cours des recherches qu'ils financent selon les intérêts qui sont les leurs. Du coup, la science des publications scientifiques cède de plus en plus le pas à la science des brevets. À cet égard, Lafontaine dira à propos du modèle québécois :

Si le modèle du chercheur-entrepreneur mis de l'avant par NanoQuébec et les organismes subventionnaires soulève des questions quant à la formation scientifique des jeunes chercheurs, la course à la rentabilité et la place grandissante de la recherche industrielle au sein de l'université entrent en contradiction, de leur côté, avec le mode de diffusion et d'échange propre au système académique. Alors que la carrière d'un chercheur repose sur sa capacité à inscrire ses travaux dans les réseaux internationaux de diffusion et d'échange scientifiques grâce à des publications et des conférences, la recherche industrielle suppose le secret et le brevetage des découvertes. (Lafontaine, 2010, p. 109-110).

La chercheuse Sandra V., interrogée par l'équipe de Céline Lafontaine, en tire la conséquence suivante : « [le] problème, c'est que dans les industries en général on garde les secrets ; en science, on ne garde jamais de secret. » (Lafontaine, 2010, p. 110). Quoi qu'il en soit, la culture du secret ne peut qu'entretenir le flou qui règne autour de la définition des nanos tout en mettant en péril l'objectivité des acteurs qui s'intéressent à la question. Dans un tel contexte, que peuvent bien valoir les définitions des nanosciences et des nanotechnologies ? Quel crédit pouvons-nous accorder à une définition quand on sait qu'elle revêt en elle-même une plasticité liée au bon vouloir intéressé de celui ou celle qui définit ?

Le problème a pourtant été identifié par Vinck dans son ouvrage intitulé *Les Nanotechnologies* (2009) où il reconnaît, d'une part, que la grande diversité des objets recouverts par les nanotechnologies incite certains à vouloir les définir de

façon large ou restreinte, tandis que d'autres veulent limiter celle-ci à des sous-ensembles. D'autre part, selon lui, il faut éviter une définition trop restrictive qui réduirait les nanos à la construction de nano-objets atome par atome. Mais la raison pour laquelle une définition de ce type devrait être évitée, de son point de vue, ne nous semble pas acceptable dans la perspective de la tentative de définition que nous initions ici. En effet, selon ses propres termes : « (...), car très rares sont les chercheurs dans le monde à s'y intéresser. » (Vinck 2009, p. 19). Même si en sociologie des sciences une telle démarche peut être pertinente et justifiée, d'un point de vue purement épistémologique, une bonne définition ne saurait se laisser distraire par l'engouement ou non, la compétence ou non des acteurs pour une pratique scientifique ou technologique quelconque. Par conséquent, la définition que nous allons proposer ici ne tiendra pas compte de ce paramètre d'habileté ou non des chercheurs qui, malgré sa pertinence sociologique, serait propre à brouiller davantage le problème à notre sens.

D'un autre côté, Sacha Loeve, dans la thèse qu'il a soutenue le 21 septembre 2009, considère que d'autres raisons président à la prolifération des définitions. Ainsi, l'innovation, la politique de la recherche et la course aux financements sont au cœur de la cacophonie définitionnelle. C'est ce qui fait dire à Loeve que :

Ces définitions ont moins pour rôle de nommer de nouveaux champs scientifiques que de les susciter. Ce sont de puissants outils de politique de la recherche. Dès lors, on comprend aisément pourquoi ces définitions adoptent une perspective volontairement externaliste, englobante et conventionnelle : elles doivent rester assez larges pour permettre à un nombre maximal de pratiques et de disciplines de s'y insérer. Du point de vue de la politique de la recherche, il y a un intérêt évident à laisser une telle définition dans un relatif flottement : encourager une dynamique de reconversion massive dans ce qui sera les nanotechnologies ; de même y a-t-il de la part des chercheurs un intérêt évident à ne pas se scandaliser du caractère peu scientifique, car très ample de la définition des nanotechnologies : pour beaucoup de laboratoires, mentionner la dimension « nano » des recherches est devenu un réquisit à leur financement. (Loeve, 2009, p. 41).

Toutes ces raisons évoquées ici sont susceptibles d'expliquer la persistance de la prolifération des définitions.

Cela dit, revenons aux problèmes posés par les enjeux de la prolifération des définitions afin de baliser le terrain qui nous permettra d'en construire une qui soit raisonnablement acceptable. À cet effet, référons-nous une nouvelle fois au texte de Vinck où il expose clairement la question :

En fait, les enjeux liés à la définition sont importants pour les chercheurs et les industriels parce que derrière les définitions il est effectivement question d'allocation de ressources (subventions pour la recherche ou pour le développement industriel, adhésion du public et acceptation sociale des produits), et de contraintes (standardisation des produits, législation, organisation des programmes de recherche et développement). La définition est donc stratégique pour les acteurs. (Vinck, 2009, p. 19-20).

Lafontaine renchérit en soutenant que : « La pluralité des définitions données aux nanotechnologies, leurs caractères relatifs et plus ou moins englobants, sont en fait indissociables des enjeux stratégiques et financiers qui leur sont associés. » (Lafontaine, 2010, p. 21). Selon elle, les chercheurs ont pleinement conscience des dimensions politiques liées à la définition de leur domaine de recherche. Ainsi, compte tenu de cette réalité de l'influence des enjeux soulignée par les deux auteurs sus cités, que devons-nous faire face à l'« indéfinissabilité » des nanos qui se caractérise par une prolifération de définitions parfois incompatibles, voire contradictoires ? Cette situation de flou total que l'on entretient autour des nanos nous paraît surfaite, voire totalement inacceptable, et ce d'autant plus qu'il semble y avoir un consensus autour de la difficulté à les définir, à un tel point que ce chercheur en pharmacie interrogé par les soins de Lafontaine prétend ce qui suit :

Je pense que la définition de la nanotechnologie dépend aussi du domaine dans lequel on travaille. [...] Chaque chercheur en science appliquée ou fondamentale peut trouver une définition de la nanotechnologie qui va correspondre à ses activités de recherche. (Lafontaine, 2010, p. 21).

Autant dire que chacun a « sa philosophie » ou « sa sociologie » et que ce qui importe, ce n'est pas la définition de « la philosophie » ou celle de « la sociologie » en tant que telle, mais celle que chaque individu qui prétend faire œuvre de philosophie ou de sociologie pourrait donner à l'une ou l'autre de ces disciplines.



C'est comme si on paraphrasait Protagoras quand il disait le plus simplement du monde que « l'homme est la mesure de toute chose ».

Pouvons-nous nous satisfaire de ce relativisme qui ne dit pas son nom et qui ressemble plus à un aveu d'impuissance que de raison ? Nous pensons que non. Avant de proposer une alternative définitionnelle précise fondée sur l'histoire et la pratique des « nanotechnologies », nous allons passer en revue quelques définitions assez éloquentes pour illustrer notre propos sur ce que nous considérons comme une « indéfinissabilité des nanos ». Mais, auparavant, faisons une petite mise au point sur le débat autour du paradigme nanotechnologique ou, pour être plus précis, nanotechnoscientifique.

#### 2.4. Les nanotechnologies : de la science à la nanotechnoscience

À ce niveau de nos investigations, il est important de préciser, autant que faire se peut, ce dont nous parlons. Nous savons que l'invention du microscope à effet tunnel a introduit une nouvelle donne dans l'univers de la recherche scientifique et technologique. Désormais, la question du statut de l'observant et de l'observé se pose avec acuité, tout comme celle de l'avenir de l'humanité ou de la « posthumanité » dans ce nouveau contexte d'évolution des possibilités de nos connaissances vers l'inconnu. Ainsi, de vieilles questions philosophiques émergent, sous l'impulsion de cette nouvelle dynamique, du cœur de la pratique « sub-nanoscopique ». Aussi, dans les lignes qui suivent, nous aurons à nous intéresser au statut de l'image et à sa capacité objectivante, puis à la question connexe du posthumain revigorée par les possibilités offertes par les technologies de l'infiniment petit, avant de voir comment le nouveau programme de recherche ouvert par les nanotechnologies remet en cause les clivages traditionnels entre science et technologie.

## 2.4.1. Entre ontologie et métaphysique des nanos

### 2.4.1.1. Objectivité et image

S'interrogeant sur la place de l'image et de l'imaginaire dans les nanotechnologies, Marina Maestrutti attire notre attention sur l'intrusion de la représentation dans la présentation des objets nanotechnologiques. Selon elle, « Dans les documents (articles, brochures, documentaires, reportages, sites Internet) qui parlent et décrivent le domaine des nanotechnologies, l'utilisation de l'image joue un rôle primordial. » (Maestrutti, 2011, p. 57). Elle attribue à celle-ci deux dimensions, dont l'une qualifiée de « documentaire » correspond à l'image scientifique obtenue par nanoscope, par exemple ; puis l'autre, considérée comme médiatique, revêt les formes de la publicité. Cependant, elle précise que dans la pratique ces deux aspects sont souvent combinés.

Pour Maestrutti, « (...) la notion d'image fait référence à celle d'imaginaire, et l'imaginaire, comme on l'a souvent souligné, est la toile de fond sur laquelle les discours et les représentations de la dimension nanométrique s'organisent. » (Maestrutti, 2011, p. 57). Ainsi, elle considère que la mise en image du nanomètre nous ouvre une nouvelle dimension encore inexplorée et jusque-là inaccessible à notre génie, ce qui lui confère quasi inévitablement le statut de « monde nouveau ». L'auteure de l'étude sur l'imaginaire des nanotechnologies considère que l'idée d'un « monde nouveau » entraîne celle de « découverte de l'inconnu » qui ne va pas sans la volonté de conquête et de maîtrise. Dans cette perspective, le rôle du STM (*Scanning Tunneling Microscopy* - microscope à effet tunnel) est de fournir un témoignage crédible du nanomètre. Mais, comme nous l'avons décrit dans le premier chapitre (1.3.1. Les instruments de l'exploration de l'infiniment petit, p. 63-68), le fonctionnement de ces nouveaux instruments de l'échelle infinitésimale est différent et ne relève pas des lois de l'optique auxquelles les microscopes nous ont habitués. En fait, le nanoscope balaye la surface à « observer » comme s'il la caressait, puis l'ordinateur en donne une représentation, dont Maestrutti dit que

c'est une présentation des atomes qui composent notre échantillon. C'est cette manière d'appréhender les phénomènes qui faisait dire à Céline Lafontaine, avant la sociologue de l'université de Paris I, que « voir, c'est faire » (Lafontaine, 2010, p. 82) et qui fait dire à Lorraine Daston et Peter Galison que « dans de telles images tactiles [où la sonde manipule le gaz électronique et en fabrique l'image tout à la fois], voir et fabriquer s'enchevêtrent – contrairement au mode de fabrication d'images plus familier qui a marqué tant de générations de scientifiques, et qui s'en tenait à une séquence en deux étapes. » (Daston et Galison, 2012, p. 446). Toujours selon Daston et Galison, ces images dites haptiques, dont l'étymologie grecque « *apto* » signifie « le toucher », sont interactives et non virtuelles comme celles des simulations. D'où l'idée selon laquelle les images du nanomètre sont des images haptiques, autrement dit obtenues par le toucher. Pour les deux auteurs, les « *images virtuelles* » sont la navigation à travers des ensembles déterminés donnés, alors que les « *images tactiles* » sont la navigation à travers l'image pour modifier les objets physiques en temps réel (Daston et Galison, 2012, p. 440). Cette distinction nette entre image haptique et image virtuelle permet de rendre compte de l'identité espérée entre l'image et sa matière qu'elle ne représente pas et qu'elle ne reproduit pas, mais qu'elle est, au sens propre. Tout se passe comme si une poupée vaudou était vraiment le sujet qu'elle est censée représenter et sur lequel les modifications de sa projection ont une incidence directe et précise, de manière à autoriser une action à distance « immédiatisée » par l'image qui se vit et s'exécute en temps réel dans le présent de la poupée qui est aussi celui du corps de la victime désignée par la prêtresse ou le prêtre compétent doté d'outils adéquats. Dans cette optique, la poupée n'a de sens et d'intérêt que dans la mesure où elle n'est ni une représentation ni une présentation, mais bien une mise en présence concrète et démontrable de celui ou celle qu'elle incarne au sens propre. Par conséquent, nous pouvons dire après Daston et Galison (in *Objectivity*, Zone Books, New York, 2007, p.390 à 392), que, mieux qu'une présentation, l'image est censée incarner le phénomène moléculaire ou atomique et non simplement en reproduire l'apparence. C'est en cela que Maestrutti a raison de souligner le fait que :

En réalité, il ne s'agit pas vraiment d'une image qui reproduit, mais d'une image qui « fait ». Dans la pratique, en effet, la succession temporelle constituée par la préparation d'un échantillon et son observation vue comme deux moments différents est complètement éliminée dans le cas du STM ou du AFM : la surface est préparée, mais l'observation est en même temps intervention, modification, et enregistrement d'une interaction entre la pointe et les atomes de surface. Comme le souligne Galison, cette nouvelle configuration du rapport entre matière et représentation marque le passage de la conception de l'image comme *évidence*, à celle de l'image comme *instrument*. La construction de diverses galeries d'images électroniques, qu'elles soient haptiques ou virtuelles, semblent (*sic*) prendre la place des vieux atlas scientifiques. (Maestrutti, 2011, p. 58).

Le fait est que les microscopes à balayage obtiennent des images en effleurant la surface à examiner avec une pointe et en interaction avec les atomes qui composent l'échantillon. Ensuite, les données recueillies sont transformées en représentation optique grâce à des modèles informatiques de traduction et de conversion. En conséquence, les images ne sont pas acquises au sens strict par l'observation directe des phénomènes ciblés par le scientifique ; elles ne sont pas non plus le résultat d'une reproduction fidèle de la nature. Elles dépendent des trois facteurs concomitants que sont l'élaboration informatisée, l'interprétation qu'en donnent les chercheurs et la contribution technique des ingénieurs. C'est ce qui fait dire à Marina Maestrutti que c'est dans le cadre de ces processus que la nature émerge avec et grâce aux artefacts que sont l'image et le processus qui lui donne corps. Il n'est pas fortuit de préciser qu'il ne s'agit pas cependant de simples fictions puisqu'elles aspirent à être des images « réelles » et non des images de la réalité. C'est pourquoi :

L'utilisation des couleurs, la mise en évidence des formes, l'effort pour rendre intelligible une structure ou un mouvement sont le résultat d'un processus qui a fait de l'image le médium principal de la connaissance et de la représentation du nanomonde. En réalité plus que de *représentation*, il faut parler, comme le suggèrent Lorraine Daston et Peter Galison, de *présentation* selon un triple sens :

Il ne s'agit pas de fournir une copie de la réalité, mais de montrer comment sur cette réalité on peut intervenir ;

Les images sont représentées comme dans une vitrine d'un magasin (aspect publicitaire) ;

Ces images s'éloignent de plus en plus de l'idée d'objectivité mécanique, garantie par les moyens de production des images affranchis de la partialité du dessin manuel et donc partiel, pour s'approcher de plus en plus du domaine de l'art.

Le champ est donc ouvert à des stratégies de visualisation qui exploitent les contributions de l'imaginaire. (Maestrutti, 2011, p. 57-58).



Ce terreau si favorable à l'expression de l'imaginaire repose tout de même sur un dispositif qui n'a rien d'imaginaire, même s'il en est le substrat. Ce dernier est bien dépeint par cette métaphore fort à propos proposée par Maestrutti lorsqu'elle décrit ci-dessous le nouveau procédé « optique » :

La pointe qui « lit » la surface comme si on lisait en braille n'est rien sans l'intelligibilité qui vient de l'élaboration informatique, étant donné la grande distance qui sépare la structure de la matière des images qui sont censées la reproduire. Ce n'est pas la science qui produit directement les images modernes, mais c'est plutôt l'application de l'ingénierie et de l'informatique qui ouvre un projet autonome d'imagerie appliquée à la science. Cependant, la vocation des images à présenter plus qu'à représenter réintroduit un aspect esthétique et artistique que l'objectivité de l'image scientifique, confiée à une production mécanique et donc non subjective, semblait avoir éliminé au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. (Maestrutti, 2011, p. 65).

Cette nouvelle méthodologie scientifique qui se caractérise par une interaction entre le chercheur et son objet d'étude par le truchement de l'image en plus de celui de l'instrument nous amène à penser que nous assistons à l'avènement d'une nouvelle manière de faire de la science basée sur un nouveau rapport à l'objet. Ainsi, cette primauté de l'image dans l'activité nanoscientifique nous fait penser à une sorte d'objectivité sans objet. Maestrutti dira à propos de cette objectivité de l'image que :

La finalité des nano-images n'est donc plus celle de représenter le réel selon une attitude de contemplation, caractéristique du savant qui observe la nature dans ses dimensions macroscopiques ou microscopiques – selon ce que Galison appelle *vie contemplative* –, mais plutôt celle d'inspiration baconienne, représentée par une attitude d'ingénieur, d'intervention dans le monde pour pouvoir établir ce qu'on est en mesure de connaître. C'est donc l'action qui produirait le savoir et c'est à travers l'utilisation des images qu'on confère consistance au réel ; cette interprétation, comme le souligne Ian Hacking, semble donc impliquer une *vie active* de la science qui considère réel ce qui est efficace. Le phénomène de l'*image gallery* en ce qui concerne les nano-images est toujours plus répandu et constitue un exemple significatif du glissement de l'image de la représentation à la présentation. (Maestrutti, 2011, p. 59).

On a le sentiment d'une substitution de l'image à l'objet qui fait perdre à celui-ci son objectivité traditionnelle qui le mettait au premier plan au profit d'une présentation inhabituelle. L'image devient ainsi objet en lieu et place de l'objet qu'elle sert et permet de l'objectiver sans en avoir les qualités intrinsèques. Ce nouveau statut de l'image en fait une base de la *nouvelle objectivité scientifique* en tant que médium objectivant sans pour autant être l'objet physique en tant que tel,

mais sans non plus trahir ses qualités. L'image devient, en quelque sorte, l'objet à voir et à manipuler. Et, c'est autour d'elle que se joue le destin de ce dernier dont elle doit exprimer l'objectivité désormais médiatisée, voire « immédiatisée » par l'image. D'où l'idée d'objectivité sans objet immédiat, tout au moins, au sens où l'objet n'est accessible que par le truchement de l'image qui habituellement en était la négation, d'une certaine façon, puisqu'elle en perdait toujours les propriétés essentielles. C'est donc par l'image que l'objet nanométrique accède à la dignité d'objet, autant dire, à son objectivité d'objet. Nous allons voir que ce changement de nature de l'image ne traduit pas seulement une métamorphose de notre rapport à elle, mais qu'il traduit surtout un progrès technologique inédit et crucial aux conséquences incommensurables. Cette nouvelle nature de l'image est complétée par une autre analyse de Maestrutti (2011) qui nous en offre une autre lecture sur le chemin qui nous mènera vers le posthumain.

#### 2.4.1.2. *Requiem* pour l'humain en attendant le posthumain

L'évolution des technologies laisse penser que c'est par elles que l'humain se redéfinit ou plutôt se dé-définit comme s'il se défaisait ou se défaussait littéralement au profit de celles-ci qui se redéfinissent par la même occasion. En fait, nous sommes de plus en plus ce que nos technologies nous permettent de savoir et de faire. L'homme du 21<sup>e</sup> siècle est un homme technologique ou un *Homo sapiens technologicus*<sup>33</sup> qui se rétrodéfinit par son savoir et son pouvoir technologiques. En tout état de cause, c'est ce que pourrait laisser penser cette analyse de Marina Maestrutti sur les images illustrant les discours, les promesses et parfois les prophéties autour des nanotechnologies. En effet, analysant l'image de couverture de la brochure produite sur ces nouvelles technologies par le *National Science and Technology council* en 1999 (voir Figure 1), elle remarque que l'image est une combinaison de deux représentations du monde obtenues avec des instruments différents. Il s'agit d'une photo du microscope à effet tunnel obtenue avec une

---

<sup>33</sup> Pour reprendre le titre de l'ouvrage de Michel Puech (2008). *Homo sapiens technologicus*.

résolution atomique et celle d'un télescope sophistiqué ayant permis la capture des images cosmiques qui surplombent la surface de silicium. Le commentaire accompagnant cette illustration dit ceci : « *On the cover: This combination of a scanning tunneling microscope image of a silicon crystal's atomic surfacescape with cosmic imagery evokes the vastness of nanoscience's potential*<sup>34</sup>. »

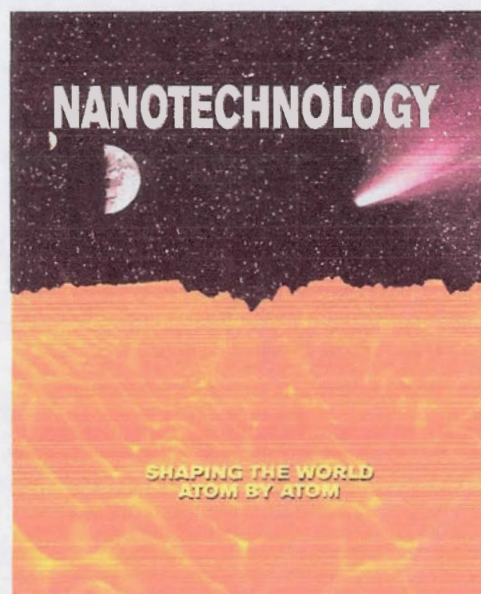


Figure 2.1 : Page de couverture de la brochure, *Nanotechnology: shaping the World Atom by Atom*, NSTC, 1999.

Sur ce point, Maestrutti consentira le généreux commentaire ci-après :

La didascalie de la couverture explique que la combinaison des dimensions nanométriques et cosmiques « évoque l'ampleur du potentiel des nanosciences ». Si l'idée de voyager dans les deux dimensions peut faire penser au désir de connaissance (qui correspond ordinairement à la posture de la science), la conquête représente une attitude beaucoup plus « pragmatique » : il s'agit de développer une ingénierie de l'échelle nano et une technologie qui permette de « jouer avec la boîte des jeux de la nature la plus élémentaire, celle des atomes et des molécules. Tout est constitué par ces éléments [...] La possibilité de créer des choses nouvelles semble donc sans

<sup>34</sup> Nanotechnology Science and Technology Council, 1999. *Nanotechnology: shaping the World Atom by Atom*, p. 1. On évoque ici les potentialités des nanosciences qui s'ouvrent sur le Cosmos.



limites<sup>35</sup>. » L'exploration de l'espace et celle de la nanodimension ont donc en commun une approche qui n'est pas exclusivement théorique ni simplement celle de créer de nouvelles capacités techniques. Les nanosciences sont intéressées à observer les nouvelles propriétés à l'intersection des physiques classiques et quantiques, mais ce qu'on va apprendre théoriquement permettra d'agir concrètement à l'échelle nano, de manipuler la matière, et peut être aussi, comme l'espérait Drexler dans les *Engins de la création (sic)*, de contribuer à la conquête de l'espace. (Maestrutti, 2011, p. 68-69).

Nous ne reviendrons pas sur la distinction préconisée ici entre nanotechnologie et nanoscience ainsi que la préséance douteuse du scientifique sur le technologique qui rejoint l'opinion de Mark et Daniel Ratner sur la question. Mais les immenses possibilités offertes par les nanos, combinées à celles qui nous ouvrent les portes de l'espace intergalactique, autorisent les commentaires relayés par Maestrutti sur le symbolisme de cette image de couverture qui semble se jouer de l'humain dont l'avenir radieux, promis par ces nouvelles technologies, semble se dessiner sans lui. D'où le recours par la sociologue parisienne à Alfred Nordmann et surtout à Bill Joy dont l'article très critique sur les nanotechnologies a suscité beaucoup d'émoi :

Comme le remarque très justement le philosophe Alfred Nordmann, l'image de couverture de la brochure est frappante par l'absence d'une présence humaine dans ces nano- et macromondes. La surface de silicium est « mystique » et inintelligible comme le monolithe de 2001 : *l'odyssée de l'espace* de Stanley Kubrick : elle est – tout comme les objets célestes à grande distance vus au télescope – inaccessible, si ce n'est à travers le microscope. Mais l'humain est absent, contrairement à la cosmogonie traditionnelle, où entre le microcosme et le macrocosme, l'être humain assure la médiation. Dès lors, et contrairement à ce que laisse supposer une vision trop confiante dans le progrès technologique, il se peut comme le dit Bill Joy dans son article *Why the Future Doesn't Need Us*, que l'avenir n'ait pas besoin de nous. À la place d'un monde d'abondance pour l'humanité, la couverture montre un espace froid et vide indifférent à l'existence humaine. Le problème de la place de l'homme se lie à celle du posthumanisme comme question sur la position de l'humain comme médiateur et médium, comme « mesure de toute chose ». (Maestrutti, 2011, p. 68-69).

---

<sup>35</sup> Noter que cette citation traduite par Maestrutti est un extrait de la p. 1 de la Brochure sus citée de la NSTC (1999) : « In April 1998, Neal Lane, Assistant to the President for Science and Technology and former Director of the National Science Foundation (NSF), stated at a Congressional hearing, "If I were asked for an area of science and engineering that will most likely produce the breakthroughs of tomorrow, I would point to nanoscale science and engineering." Lane is not alone in this view. Many scientists, including physicist and Nobel laureate Horst Stormer of Lucent Technologies and Columbia University, are themselves amazed that the emerging nanotechnology may provide humanity with unprecedented control over the material world. Says Stormer: "Nanotechnology has given us the tools... to play with the ultimate toy box of nature — atoms and molecules. Everything is made from it. The possibilities to create new things appear limitless." »



Ainsi, la fin de l'humain tel que nous l'avons connu jusqu'ici pourrait être amorcée à cause ou grâce à la technologie, c'est selon. La route qui nous mènera à cet autodépassement est comme une transnationale qui se joue des frontières au moins autant que le transhumain se joue des limites de la nature humaine. Mais, à l'instar d'une transnationale, il est la voie qui emprunte l'humain, passe par lui, mais uniquement pour mener au posthumain. En d'autres termes, c'est un état transitoire qui vise à dépasser notre humanité jugée trop banale, trop précaire, voire trop médiocre, par des transhumanistes et des posthumanistes comme Mihail C. Roco et William Sims Bainbridge (2003). Commentant la démarche de ces voix autorisées de la *NSF (National Science Foundation)*, Jean-Pierre Dupuy et Françoise Roure estiment que :

L'artificialisation de la nature et la naturalisation de l'Homme sont traitées comme un fait accompli par l'approche américaine de la NSF, sous réserve de l'appréciation des risques au sens de la causalité simple ou éventuellement systémique de l'écotoxicologie. La voie est par conséquent ouverte au progrès rapide dans tous les domaines des technologies à capacité transformationnelle et vers leur convergence. Le rôle des pouvoirs publics consiste à établir un ensemble de conditions favorables à l'initiative privée tout en garantissant l'acceptabilité par l'opinion publique. (Dupuy et Roure, 2004, p. 35).

Ce brouillage des frontières est favorisé par plusieurs facteurs dont le moindre n'est ni la difficulté à circonscrire la limite entre nanotechnologies et nanosciences ni la convergence NBIC qui sert d'acrotère à cette métaphysique des nanos. Les NBIC désignent ainsi, selon M. C. Roco et W. S. Bainbridge, la combinaison synergique entre quatre fondamentaux, en l'occurrence, les Nanosciences, la Biologie, l'Informatique et les Sciences cognitives<sup>36</sup>. Si l'on concède aux deux membres de

---

<sup>36</sup> « The phrase "convergent technologies" refers to synergistic combination of four major "NBIC" (nano-bio-info-cogno) provinces of science and technology, each of which is currently processing at a rapid rate: (a) nanoscience and nanotechnology; (b) biotechnology and biomedicine, including advanced computing and communications; (d) cognitive science, including cognitive neuroscience. »

**Timely and Broad Opportunity.** Convergence of diverse technologies is based on *material unity at the nanoscale and on technology integration from that scale*. The building blocks of matter that are fundamental to all sciences originate at the nanoscale. Revolutionary advances at the interfaces between previously separate fields of science and technology are ready to create key *transforming tools* for NBIC technologies. Developments in systems approaches, mathematics, and computation in conjunction with NBIC allow us for the first time to understand the natural world, human society, and scientific research as *closely coupled complex, hierarchical systems*. At this moment in the

la NSF (National Science Foundation) le fait que la science peut se définir par son objet, on n'aura pas de mal à concevoir l'assertion suivante : « Convergence of diverse technologies is based on material unity at the nanoscale and on technology integration from that scale. The building blocks of matter that are fundamental to all sciences originate at the nanoscale. » (Roco et Bainbridge, 2003, p. ix). Autrement dit, à cette échelle, nous sommes au cœur de la structure de la matière, là où tous les objets des sciences convergent et d'où se construisent les spécificités de chaque molécule. Cela justifie l'idée de métaconvergence impliquée par une telle « synthèse » de la matière avec pour conséquence immédiate la revivification des thèses transhumanistes et posthumanistes qui trouvent en cette nouvelle déclinaison des technosciences un terreau favorable à l'épanouissement de leurs idées qui peinent à rencontrer des échos sympathiques.

Il convient de rappeler que la technologie, dans notre contexte scientificotechnologique actuel, se sert de plus en plus de la science pour mettre en œuvre des applications tirées de son évolution et de celle de la science qui profite en retour des progrès technologiques afin d'aller plus loin dans ses propres investigations. Enfin, pour clore ce point, concédons à Wautelet le fait que la frontière entre nanosciences et nanotechnologies, si elle existe, est en définitive très ténue. Il y a un phénomène quasi permanent de va-et-vient entre science et technologie qui rend toute volonté de les dissocier durablement tout à fait scabreuse. C'est pourquoi, nous adhérons à cette vision simplificatrice certes, mais plutôt opérationnelle que nous jugeons assez à propos.

---

evolution of technical achievement, *improvement of human performance through integration of technologies* becomes possible. » In *Technologies for Improving Human Performance*, Mihail C. Roco and William Sims Bainbridge, éd. Kluwer Academic Publisher, Netherlands 2003, p. ix (La première partie du second paragraphe est en gras dans le texte cité ici).

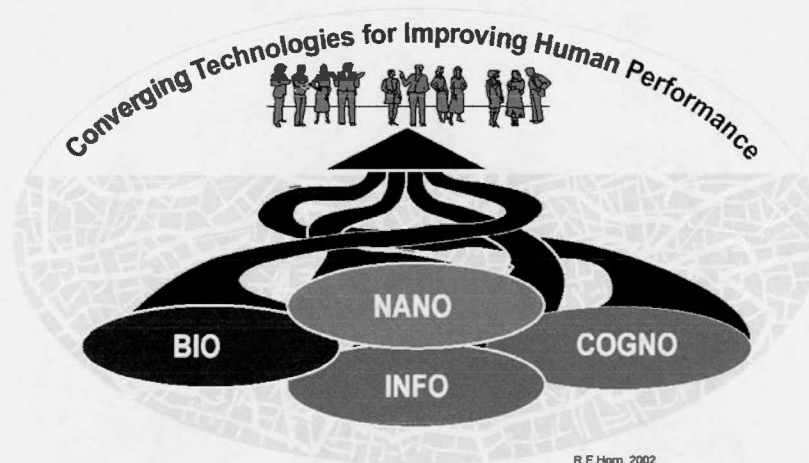


Figure 2.2 : « Changing the societal “fabric” towards a new structure (upper figure by R.E. Horn) »  
(Figure emprunté au texte de Roco et Bainbridge, *Converging Technologies for Improving Human Performance*, éd. Kluwer Academic Publisher, Netherlands 2003, p. vii).

Toutefois, nous lui préférons le terme « nanotechnoscience » qui, à notre sens, exprime de façon plus appropriée ce nouvel espace de recherche commun autant à la science qu'à la technologie et au sein duquel l'une et l'autre sont logées à la même enseigne de « chercheurs » et dont il convient de dire quelques mots à ce stade de notre investigation. En effet, à quoi correspond vraiment cet espace défini comme le champ d'action du nanotechnologue ? Sommes-nous en science, en technologie, en technoscience ou en « nanotechnoscience » comme nous le pensons ?

#### 2.4.2. Science et/ou technologie : vers la nanotechnoscience

Si nous commençons ce point en tentant de définir la science, nous risquons de nous heurter à un problème quasi insoluble, de l'avis d'un spécialiste comme Ludovic Bot (2007, p. 21) :

Mais avouons dès maintenant l'évidence : nous sommes incapables de définir de façon claire et générale ce que peut être *la science*. Ce terme évoque dans notre culture

davantage une invocation mythique ou la tentation du raccourci autoritaire que des argumentations sérieuses.

Cependant, malgré le caractère périlleux d'une telle entreprise, l'on entend souvent parler de « science humaine », « science sociale », « science exacte », « science molle » ou encore de « science pure » présupposant l'existence d'une « science impure » par rapport à laquelle celle-ci se définirait. Mais, quel sens y aurait-il à envisager l'idée même de science pure quand on sait qu'historiquement la plupart des sciences modernes sont issues de la technique ? En effet, rappelle Bernadette Bensaude-Vincent se référant à l'étude de Michel Serres sur *Les origines de la géométrie* (Flammarion, Paris, 1992) :

On a souvent assigné comme origines de la géométrie les techniques d'arpentage, de tracé des champs après les crues annuelles du Nil. On peut également trouver les origines de la mécanique dans les théâtres de machines, où s'est développé le goût de l'expérimentation et de la vérification. Quant à la chimie, elle plonge ses racines dans l'art des verriers, des teinturiers, métallurgistes, comme dans la pharmacie. (Bensaude-Vincent, 2009, p. 49-50).

Cependant, malgré leurs origines techniques avérées, les sciences ont tout de même réussi la prouesse de se dégager de leurs origines empiriques pour se construire une sorte de nature immaculée bien loin de toute souillure technique. C'est pourquoi Bensaude-Vincent croit bon de rappeler que « (...) la science pure est une idole forgée au prix d'un coup de force qui tend à éclipser la dimension artisanale. » (Bensaude-Vincent, 2009, p. 50). En effet, la dichotomie « pur/appliqué » a une origine assignable que l'historienne des sciences situe dans les années 1750. Elle en attribue la paternité à un chimiste suédois du nom de Johan Gottschalk Wallerius (1709-1785) qui, suite à sa nomination à la Chaire de chimie, médecine et pharmacie à l'Université d'Uppsala y introduit les expressions « *chimia pura* » et « *chimia applicata* » qu'il mentionne dans le traité qu'il publia en 1751 (Bernadette Bensaude-Vincent, 2009, p. 50). C'est pourquoi pour Bensaude-Vincent (2009, p. 51), « la pureté de la science est une notion purement idéologique. » En outre, l'internalisation de la technique au cœur des pratiques de recherche scientifique n'est pas, non plus, une nouveauté.



Mais force est de reconnaître que l'idéologie de la science pure a tellement bien fonctionné que l'historienne Ann Johnson de la *Fordham University* a consacré un article à l'analyse de sa mort. En effet, le titre du chapitre publié dans l'ouvrage *Discovering the Nanoscale* en 2004 sous la direction de Davis Baird et Alfred Nordmann sous le titre « The end of the Pure Science : Science Policy from Bayh-Dole to the NNI » laisse entendre que ce que Bensaude-Vincent a qualifié d'« idéologie » n'était pas considéré comme tel par tout le monde. Nous verrons après la présentation des grandes lignes du texte de Johnson que finalement, que la « science pure » ait existé ou pas, c'en est bien fini, en tout cas, d'une certaine idée qu'on se faisait d'elle.

Ainsi, ayant constaté que : « *Most of the debate about what federal science policy should be, has focused on two questions – what is the role of science and technology in national security and what is the role of science and technology in economic growth.* » (Johnson, 2004, p. 217), elle se donne l'objectif suivant :

« This paper details the shift from military to economic motives for American science from 1980 through the turn of the century. While this shift was caused in part by the end of the Cold War, the economic challenges of the late 1970s and early 1980s first laid the ground for a new kind of federal involvement in scientific research as an economic engine. This new economically driven science policy has culminated in the National Nanotechnology Initiative of 2000. » (Johnson, 2004, p. 217).

Ainsi, Johnson se propose de déterminer le moment où ces changements ont commencé à se produire et les circonstances historiques particulières de ces changements tout en promettant d'aider à répondre à la question de savoir pourquoi ceux-ci ont commencé à se produire. Ce document est un examen historique de ces changements qui se concentre en grande partie sur les problèmes que les décideurs ont détectés dans la recherche scientifique et technologique soutenue par le gouvernement fédéral, et sur la manière dont ils espéraient que les politiques individuelles répondent à ces questions. Pourtant, alors que différents textes législatifs ont été conçus pour répondre aux préoccupations particulières, la somme

totale des changements entre les années 1970 et aujourd'hui suggère que certains grands changements ont eu lieu (Johnson, 2004, p. 217).

En prélude à ces bouleversements annoncés, le Président du *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* de l'époque, Charles Vest (1990-2004), tenait ce discours rapporté par Johnson (2004, p. 217) :

« We are in a period of fundamental reconsideration of US science and technology policy. The end of the Cold War, the changing nature of US economic competitiveness, and the increasing direct involvement of Congress in science policy have led to a lack of stability in goals and philosophy. The roles of government, industry, and academia are being examined in a fundamental way. »

Selon Ann Johnson, alors que le directeur du MIT disait cela en 1995, des changements décisifs, à l'initiative de l'équipe de Bill Clinton, s'annonçaient :

« Nanotechnology emerges exactly in this reconsidered moment of science and technology policy, and some would argue that it rises to prominence in part because of this new regime. Nanotechnology policy has become a centerpiece of science and technology policy at the turn of the 21st century. Arguments about whether nanotechnology constitutes a new way of doing and thinking about science must, therefore, consider the role the government has come to play in scientific and technological research as a result of the changing governmental attitude toward research beginning in the 1980s. » (Johnson, 2004, p. 217).

Ainsi, tour à tour, Ann Johnson analyse en sept points la question. Tout d'abord, elle s'intéresse à la complexité de la politique scientifique et technologique des États-Unis qui est étroitement liée au budget fédéral alloué à la science. C'est ce qui explique que l'étude des allocations budgétaires pour déterminer l'importance et la direction des sciences et technologies de 1980 à 1990 révèle une stabilité. Cependant, selon Johnson, cette situation change radicalement dès que l'on s'intéresse non plus aux financements gouvernementaux, mais aux changements de politique. Ainsi, dit-elle : « (...) *if the full array of policy shifts, and not just funding, are taken into account and placed in their historical perspective, a dynamic picture of science and technology policy arises.* » (A. Johnson, 2004, p. 218). C'est pourquoi, plutôt que de se contenter de scruter les budgets accordés aux sciences et

technologies, comme le fait Daniel Sarewitz<sup>37</sup> (2003, p. 1), elle décide, dans une perspective historique, de s'intéresser aux changements politiques ainsi qu'à leur impact sur l'organisation et le développement de la recherche aux États-Unis. Dans cette optique, elle se propose de montrer comment les changements structurels, éducatifs, réglementaires et particulièrement légaux dans les années 1980 ont préparé le terrain pour des changements dans la manière d'allouer et de répartir les budgets dans les années 1990, donnant une image beaucoup plus claire de ce qu'est la place de la science et de la technologie pour le gouvernement fédéral américain<sup>38</sup>.

Puis, l'historienne des sciences s'intéresse à une évolution dans la politique scientifiotechnologique qu'elle décrit comme le passage d'une science et technologie de guerre froide à une technoscience pour la compétitivité mondiale. Voici comment elle présente cette situation :

« As a result of looking to science and technology to end economic malaise, government interests in sponsored R&D shifted from so-called basic science, justified by military needs to a new paradigm of directed research, justified by economic needs. In the 1950s and 60s science and technology policy was guided by the 'pipeline' model of the relationship of science to technology championed by Vannevar Bush (Branscomb 1993, p. 9-10). In this scheme, federally funded basic science would provide the new knowledge that underpinned new technological developments. Government spending needed to focus on basic, non-targeted research because this kind of scientific work was both fundamental and less attractive to the private sector.

<sup>37</sup> Daniel Sarewitz (2003), « Does Science Policy Exist, and If So, Does it Matter? Some Observations on the U.S. R&D Budget » Discussion Paper for Earth Institute Science, Technology, and Global Development Seminar, April 8, 2003 : « It is not only axiomatic but also true that federal science policy is largely played out as federal science *budget* policy. Public discourse related to the nation's S&T enterprise focuses obsessively on funding and budget numbers—especially each fiscal year's incremental change over the prior year. Science advocacy organizations such as the American Association for the Advancement of Science, the National Academy of Sciences, and various scientific societies carefully monitor the budget process and issue annual assessments; while issue-focused interest groups such as disease lobbies and environmental NGOs focus on agencies and programs of specific relevance to their constituencies. Overall, it is fair to say that marginal budgetary changes are treated by the S&T community (scientists, science bureaucrats and advocates, administrators of R&D institutions, etc.) as surrogates for the well-being of the science enterprise, whereas the interested public considers such changes to be surrogates for progress toward particular societal goals. », p. 1 (document accessible en ligne : [www.cspo.org/products/papers/budget\\_seminar.pdf](http://www.cspo.org/products/papers/budget_seminar.pdf)).

<sup>38</sup> Voir Ann Johnson, in Baird & Nordmann & J. Schummer (2004), « The End of Pure Science: Science Policy from Bayh-Dole to the NNI », *Discovering the Nanoscale*, IOS Press, Amsterdam : « I will argue here that structural, educational, regulatory, and particularly legal changes in the 1980s set the stage for changes in how money has been allocated in the 1990s, giving a much clearer picture of what has happened to the place of science and technology in US federal government. » p. 218.

This linear picture was attacked by the 1966 Project Hindsight report. This study, sponsored by the Department of Defense, claimed that 'pure' science contributed little to the actual development of new weapons systems. On the heels of Hindsight, policy makers asked whether it made sense to claim a linear relationship for basic research and civilian technologies, if undirected scientific research contributed little to sophisticated defense technology? As a result, basic, un-directed research was under a continuing assault throughout the 1970s. As economic circumstances worsened after 1973, policy makers wanted to demand more economic bang for their research buck. American scientific research had to be part of the solution; American scientific superiority needed to translate into economic performance. But to do so, the role of the federal government had to change, and these changes took over a decade to put into place. » (Johnson, 2004, p. 219).

Il s'en suit que vers la fin des années 1980, sous la présidence de Georges W. Bush Sr., élu en 1988, la rhétorique agressive tentant de justifier en termes économiques les dépenses fédérales dans les sciences finit par payer puisqu'entre 1990 et 2000 un certain nombre de rapports et de revues importantes commencent à abonder dans le sens du développement d'une science et d'une technologie au service de l'économie et plus globalement de l'intérêt national (Johnson, 2004, p. 219).

Mais, à l'origine de ces changements d'envergure dans l'attitude des politiques vis-à-vis de la recherche scientifiqueotechnologique, il y a une longue histoire dont le point focal fut, selon Johnson, la loi Bayh-Doyle ou *Bayh-Dole Act*, du nom des deux rapporteurs (Birch Bayhl, démocrate et Bob Doyle, républicain) de la loi états-unienne sur les brevets, « *The Patent and Trademark Law Amendments Act* » voté par le Congrès le 12 décembre 1980 après le *Stevenson-Wydler Technology Innovation Act* adopté la même année. Ann Johnson décrit cette loi et les effets qui en sont attendus ci-après :

« On December 12, 1980, the Patent and Trademark Law Amendments Act became law. This bill, commonly known as the Bayh-Dole Act, because it was initially introduced by Robert Dole and Birch Bayh, was a more direct attempt to transfer knowledge from universities and federal laboratories to commercial applications. Prior to Bayh-Dole, research funded publicly could be patented, but the licenses were not exclusive unless a waiver could be obtained. Research that was publicly funded was publicly available. As a result, there was a considerable disincentive for private concerns to purchase licenses to university-performed research, since they could not be assured that a competitor would not beat them to market with a similar product. In addition, different funding agencies had different rules about patenting and licensing inventions produced with federal funding. This created an extraordinarily complex set of laws under which universities had to operate; as a result, only a small number of



research universities engaged in patenting. Bayh-Dole changed this environment by creating a common set of patenting and licensing rules for all government sponsored research and development (with the notable exception of classified research).

Under Bayh-Dole, the government retained non-exclusive rights to patents developed with public funds, but universities could grant exclusive licenses to commercial interests. The framers of the policy imagined that Bayh-Dole would create an incentive system to facilitate technology transfer from university labs to the market. Like the Stevenson-Wydler Act, Bayh-Dole itself did nothing to fund research; instead it constituted a legal change that made university-industry collaboration much more feasible and attractive. David Mowery, who has studied the effects of Bayh-Dole at some length, has also pointed out that Bayh-Dole made nothing legal that was previously illegal – instead, it rationalized patenting rules across multiple agencies (Mowery 2002, p. 265). » (Johnson, 2004, p. 220).

Ce grand pas vers le rapprochement de la recherche publique et des intérêts privés aboutit à la mise sur pied de la *Nanotechnology Initiative* sous l'ère Clinton dont le vice-président Albert Arnold Gore Jr., plus connu sous le nom d'Al Gore, disait que la vision des sciences et technologies ressemblait plus à un écosystème qu'à une ligne de production. Selon lui, « *Technology is the engine of economic growth; science fuels technology's engine.* » (Johnson, 2004, p. 223). Ce qui correspond finalement à la vision erronée que l'on se fait habituellement de la relation entre science et technologie dont la première précéderait la seconde tout en en alimentant les innovations et les performances. Pour Johnson, le second mandat de Bill Clinton a permis de consacrer un changement de paradigme important en réussissant clairement à faire passer la politique scientifique et technologique d'une mentalité de guerre froide déterminée par les besoins militaires à un souci de compétitivité économique sous-tendu par une justification d'ordre économique (Johnson, 2004, p. 223). Ainsi, la *Nanotechnology National Initiative* fut officiellement lancée au printemps 2000. Pour sa première année d'existence, Clinton réussit à lui consacrer un budget total de 497 millions de dollars réparti entre les six agences que sont la *Nation Science Foundation (NSF)*, la NASA, la *National Institute of Health (NIH)* et les Ministères de la Défense, de l'Énergie et du Commerce. À notre avis, c'est ici que l'analyse politicolégislative d'Ann Johnson rejoint l'approche de Daniel Sarewitz (2003) et que les succès de près de vingt ans d'efforts politiques en faveur de la « marchandisation » des sciences et technologies finissent par se traduire littéralement en espèces pour les activités technoscientifiques. C'est ainsi que l'analyse de Johnson la conduit à constater l'aboutissement d'un processus qui se

précise au fur et à mesure qu'on la suit dans son raisonnement et qui mène à la rencontre inévitable avec ce que John Ziman (1925-2005) appelle la science « post académique ».

Arrêtons-nous un moment sur ce concept de Ziman évoqué ici et qui, en soi, n'exprime pas une nouveauté radicale, mais présente le mérite de circonscrire, avec ce qu'il faut de précision et de vague pour toute tentative ultérieure de circonscription d'une réalité complexe, l'espace qui serait compatible avec l'activité « nanotechnoscientifique » telle que nous l'entendons. En fait, Kellogg (2006) dans son analyse du concept de science post-académique rappelle que l'image publique de la science au cours de la période d'après-guerre était celle de la science académique, alors que la recherche effectuée dans les milieux industriels au cours de cette même période a été difficilement considérée comme de la science, mais plutôt comme de la technologie ou de la science appliquée.

Les images contrastent dans les moindres détails. En effet, l'institution de la science académique est l'université, l'institution de la science industrielle, en revanche, est la recherche en entreprise et dans les laboratoires de recherche et développement (R&D). La science académique est prise en charge par des subventions, alors que la science industrielle est soutenue par les bénéfices réels ou attendus. La science académique est motivée par la curiosité et l'opportunité, alors que la science industrielle est pilotée par un agenda commercial. La science académique est largement diffusée grâce à la publication évaluée par les pairs, mais la science industrielle est étroitement contenue et restreinte. Généralement, la science académique se concentre sur les questions de base, tandis que la science industrielle met l'accent sur les applications. (Kellog 2006, p. 11-12).

Même s'il faut convenir que la science, comme le rappelle David Kellogg, est une réalité bien complexe et qu'elle a de multiples facettes, l'intention de John Michael Ziman est de parler de l'idée scientifique ; autrement dit, de la façon dont la science est entendue au sein des systèmes éducatifs et culturels. Ainsi, Ziman prend les

quatre normes empruntées à Merton, y ajoute sa norme tardive d'originalité, et énonce ce qu'il conçoit comme le système de récompense de la science académique « CUDOS » (Communiste, Universelle, Désintéressée, Original, Sceptique). Pour lui, la science industrielle contraste d'avec la science académique en étant propriétaire plutôt que communautaire, locale plutôt qu'universelle, autoritaire plutôt que désintéressée, commandée plutôt qu'originale, et expert plutôt que sceptique. (Ziman, 2000, p. 78-79). « Ce n'est pas un hasard, écrit Ziman, que ces attributs exprimés par « PLACE », plutôt que « CUDOS », soient ce que vous avez pour faire une bonne science industrielle. » (2000, p. 79).

**Table 1: Academic vs. Industrial Science**

<b>Academic Science</b>	<b>Industrial Science</b>
Communalist	Proprietary
Universal	Local
Disinterested	Authoritarian
Original	Commissioned
Skeptical	Expert

Figure 2.3 : Énumération des normes de la science académique vs industrielle (Kellogg, 2006, Table 1, p. 12).

De l'avis de certains observateurs, nous sommes entrés dans une ère nouvelle de l'appropriation de la connaissance scientifique. Un groupe international de chercheurs a fait valoir l'idée que nous entrons dans un « Mode 1 » sous forme de production de connaissances, où le « Mode 1 » se réfère à ce que nous avons appelé la science académique (Gibbons et coll., 1994). John Ziman donne au nouveau système le nom de science post-académique ou postuniversitaire (Ziman, 2000). En fait, ce qui change, c'est notre définition de la science elle-même. Le nouveau régime montre que l'image idéalisée de la science ne tient plus. Le terme science post-académique suggère que la science ne convient plus aujourd'hui ni au modèle académique, ni au modèle industriel. Par exemple, le modèle de production de

connaissance de la science académique suppose que la connaissance a commencé dans le laboratoire ou un autre établissement universitaire, puisqu'elle s'est déplacée dans le sens de la demande ou de la technologie. En revanche, la science post-académique reconnaît que les changements technologiques peuvent conduire la recherche fondamentale : la connaissance se déplace dans les deux sens et peut être créée au niveau du point d'application (Gibbons et coll. 1994). La science post-académique est souvent conduite tant par la technologie elle-même que par l'accumulation et l'analyse de quantités massives de données ainsi que par les tests d'hypothèses (Kellogg, 2006, p. 13-14).

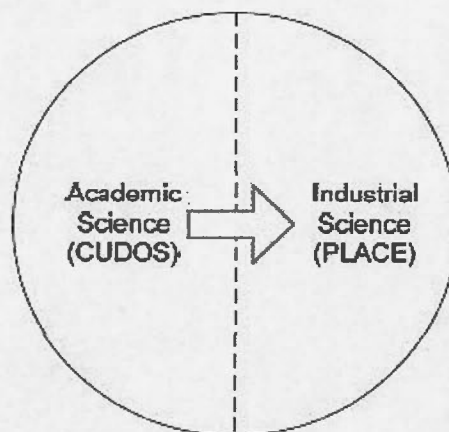


Figure 2.4 : Séparation entre science académique et science industrielle (Kellogg 2006, Figure 1, p. 13)

Enfin, pour terminer ce point sur la science dite post-académique, redonnons la parole à David Kellogg qui affirme :

The Mertonian division of academic from industrial science may be a myth, like the idea of a single, universally applicable scientific method (Bauer, 1992). But if so, then it is a myth reproduced by educational structures, extended into the world by numerous daily practices, and supported by an elaborate network of political and economic relationships. None of the features of post-academic science is absolutely



new; its roots go back all the way to the early days of academic science itself<sup>39</sup>. The military-industrial complex continually blurred the lines between science and technology, between research and industry, and between academia, industry, and government (Geiger, 1992). For example, the Advanced Projects Research Agency (later the Defense Advanced Project Research Agency or DARPA) was created at the high point of academic science but connected industry, government, and academia from its inception; later, it provided key support for the early networking systems that later became the Internet (Leiner et al., 2003). What is different about the contemporary moment is that various trends of networking and interconnection, some of them with a long ancestry, have converged and have extended into virtually all areas of scientific inquiry, suggesting that traditional understandings of the contract between science and society are fundamentally shifting (Slaughter & Rhoades, 2005).

As an emerging social practice and textual economy, post-academic science eludes precise definition. But we can identify several important trends. (Kellogg, 2006, p. 13-14).

Enfin, Ziman, tout comme Johnson, considère que les évaluations commerciales des découvertes précèdent et deviennent plus importantes que leur validation scientifique (Ziman, 2000, p. 74).

Venons-en maintenant à la conclusion de l'analyse d'Ann Johnson après cette longue parenthèse sur la conception zimanienne de ce qu'il appelle la « science post-académique ». Tout compte fait, le nouvel accent mis sur l'utilité exige des scientifiques qu'ils rendent également des comptes aux institutions non scientifiques, opérant en dehors de la communauté scientifique, notamment les entreprises et les agents gouvernementaux. Les conséquences éthiques impliquées sont explicites. En effet, si la science se fait en vue d'applications, alors les scientifiques ne peuvent plus rester neutres quant à l'utilisation potentielle de leurs travaux. (Johnson, 2004, p. 225).

---

<sup>39</sup> Voir sur ce point la note de bas de page n° 15, p. 14 - David Kellogg, « Toward A Post-Academic Science Policy : Scientific Communication And The Collapse Of The Mertonian Norms », *International Journal of Communications Law & Policy*, Special Issue, Access to Knowledge, Autumn 2006 : « Critiques of the academic science structure also go back to its beginnings. As early as 1945, scientists involved in the Manhattan Project formed the Federation of American Scientists (FAS) in opposition to nuclear weapons proliferation; the FAS now has a broad mission "to provide the public, media and policymakers with high-quality information to better inform debates and decisions on science-related issues" (Federation of American Scientists, 2005). »

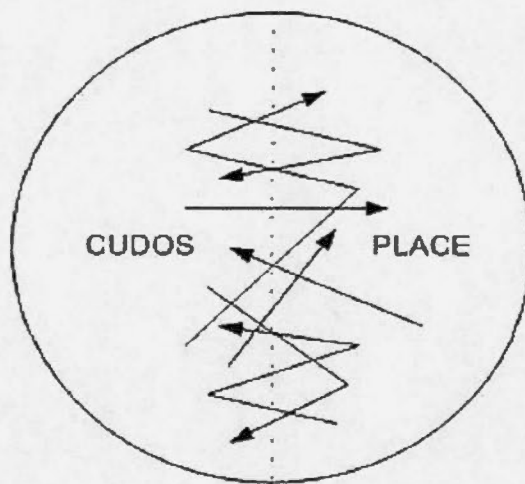


Figure 2.5 : La science post-académique (Kellogg 2006, Figure 2, p. 20)

En outre, de l'avis de Johnson, l'histoire des sciences regorge de cas de sciences accomplies sans se préoccuper d'une quelconque application, et qui sont par la suite devenues extrêmement rentables économiquement. (Voir Johnson, 2004, p. 225). Mais, le problème est que nous sommes confrontés à une réalité de la marche du monde qui lie des acteurs aux intérêts hétéroclites autour d'une même activité naguère aux allures parnassiennes, aujourd'hui confrontés à la prédominance, non pas de l'utilitaire, mais plutôt de l'« ustensilitaire ». C'est probablement cet état de fait qui pousse Ann Johnson à dire que la science peut être importante pour les scientifiques afin d'exposer les connaissances fondamentales sur le monde. Mais elle est importante aussi pour les politiciens et le public pour générer des produits et des emplois. Cependant, selon elle, en réalité, il n'y a aucune raison de ne pas réclamer que la science ne fasse tous les trois, c'est-à-dire livrer des connaissances fondamentales dont une partie donnerait lieu à une valorisation susceptible de créer des emplois. Nonobstant cette possibilité, les deux dernières options permettant de justifier les dépenses publiques de manière plus concrète et populaire sont nettement plus favorisées que la première. (Johnson, 2004, p. 225).

De son étude, l'historienne des sciences du département d'histoire et de philosophie de l'université de Caroline du Sud (*University of South Carolina*) tire l'enseignement suivant : « *nanotechnology hardly represents the end of pure science as I provocatively titled this paper. However, it does stand as an exemplar for a new relationship between science, politics, and economy, where seeking the fundamental truths lacks political punch.* » (Johnson, 2004, p. 226).

Tout compte fait, si l'on en croit Bernadette Bensaude-Vincent, Ann Johnson, David Kellogg et John Ziman, la « science pure », si elle a jamais existé, a perdu de sa superbe et il faut sérieusement envisager de considérer la « nouvelle science » telle qu'elle est et non pas telle qu'elle fut ou telle que l'on voudrait qu'elle soit. Selon ces auteurs, il y a diverses manières d'envisager cette requalification de la science. C'est la raison pour laquelle de nombreuses approches sont proposées. Certaines préconisent le maintien du concept de « science » tout en y adjoignant les nouveaux contenus qui s'imposent à la création de concepts recomposés afin de mieux coller à la nouveauté. Ainsi avons-nous entendu parler de « technologie » qui, en soi, renferme une certaine hybridité (technique/technologie) ; ou celui qui consacre une autre forme d'enchevêtrement qui se fait « technoscience » et traduit la relation viscérale qui lie science et technologie.

Étant donné la tendance au consensus autour de cette « impureté » qui semble s'imposer de plus en plus, il faut convenir que l'avènement des nanotechnologies n'a fait que renforcer ce sentiment. Ainsi, cette hybridation, constitutive de la science, loin de se dissiper au fil des siècles, a fini par être confortée, et même renforcée, par ce que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de « nanotechnologie ». À vrai dire, qu'on le veuille ou non, nous sommes confrontés à une « réalité » nouvelle que nous essayons de désigner avec notre langage de tous les jours. C'est ce qui explique une certaine forme d'inflation linguistique autour de cette question. C'est pourquoi « technoscience », « nanotechnologie », « nanoscience », « nanotech » (Cressler, 2009), « *nanoscale research* » (Nordmann, 2004) ou encore « *NanoTechnoScience* » (Nordmann, 2004 ; Schwarz, 2004), terme

que nous retiendrons ici, réfèrent toutes au même domaine scientifiqueotechnologique que nous avons beaucoup de mal à circonscrire.

Malgré le fait que l'on ne peut récuser aucun de ces choix conceptuels, qui bien souvent renvoient plus ou moins à des choses similaires, il nous semble important d'adopter une certaine forme de conséquentialisme afin de composer le terme qui sied le mieux à ce nouveau champ de recherche de savoir et de savoir-faire. Pour bien comprendre notre démarche, intéressons-nous à la définition proposée par John D. Cressler dans son ouvrage au titre évocateur, *Silicon Earth*. En fait, conscient de la nature fondamentalement hétéroclite de ce qu'il tente de décrire comme « nanotechnologie », le professeur d'ingénierie électrique et informatique de la *Georgia Institute of Technology* (*Georgia Technique*) propose la définition « exacte » suivante :

Loosely defined, nanotechnology is the science, engineering, and application of materials of nanometer-scale dimensionality. When I say nanometer scale, I mean objects in the range of say 0.1-100 nm in size. Nanogames to be played at a "few" molecular diameters [for reference, the diameter of a water molecule ( $H_2O = H-O-H$ ) is about 0.29 nm; the double helix of DNA molecule is about 2.5 nm in diameter]. Want be in-the-know? Don't say nanotechnology, say "nanotech". (Cressler, 2009, p. 394).

Bien que nous partagions la même préoccupation que Cressler sur le caractère inapproprié du terme « nanotechnologie » pour désigner ce que ce mot est censé recouvrir comme sens, nous lui préférons le morphème « nanotechnoscience » qui nous paraît porter dans sa composition même l'idée que nous cherchons à circonscrire.



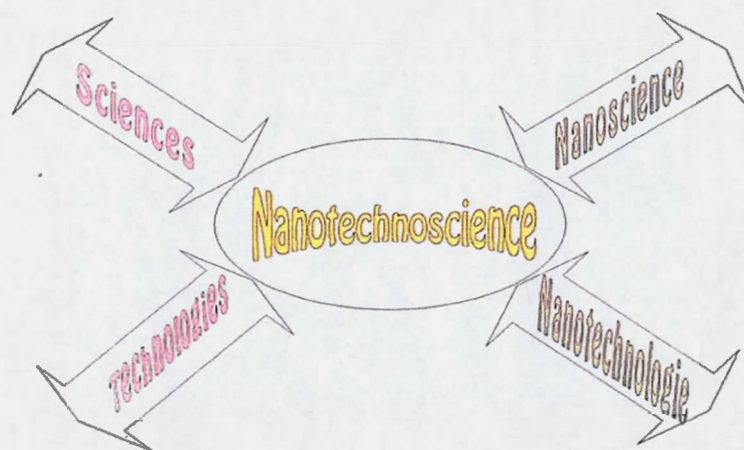


Figure 2.6 : Schéma des interactions entre sciences & technologies – Nanotechnoscience – Nanoscience & Nanotechnologie selon Guèye

Pour nous, en effet, la nanotechnoscience est plus qu'un cadre de recherche « technoscientifique », elle se rapproche plutôt de l'univers micro-macro-astro dont elle est le pendant à l'échelle nano-femto-yocto. Ce sera, en quelque sorte, comme le point d'accès de l'univers inversé, un passage obligé de l'infiniment grand vers l'infiniment petit que seuls des équipements ultrasophistiqués permettront d'appréhender plus ou moins efficacement. De ce fait, les nanotechnosciences incarnent l'ouverture vers l'infiniment petit qui n'est rien d'autre que l'ouverture vers de nouvelles possibilités complètement inouïes. Ensuite, celles-ci rendront possibles les nanosciences et les nanotechnologies. Les premières permettront la production de connaissances nouvelles dans le prolongement de la nanophysique et de la mécanique quantique en général, voire la théorie des cordes. Les secondes, grâce à la méthodologie encore balbutiante du *bottom-up*, permettront de faire de la technologie autrement. Pour reprendre la belle image de John D. Cressler (2009, p. 394-395) : « *this bottom-up strategy often resembles an organic "seed-to-tree" model; it begins small and simple, but rapidly grows in complexity and competence, hopefully to the correct end result.* »

## 2.5. Définir les nanotechnologies

Afin de mesurer la complexité d'une telle entreprise, rappelons que la revue *Nature Nanotechnology* a consacré quelques pages de son premier numéro d'octobre 2006 à une série d'interviews visant à recueillir un échantillon significatif de la pluralité des acceptions de « nano » par treize personnalités du champ des nanotechnologies. Mais, celle-ci, plutôt que de contribuer à favoriser l'émergence d'une définition consensuelle, a révélé la diversité des définitions, leur absence de neutralité et leur caractère orienté (Loeve, 2009, p. 44). Nous allons tenter ici une approche différente consciente de la nécessité de se libérer d'un certain nombre de parti-pris. Dans cette perspective, nous adopterons une position similaire à celle d'Alfred Nordmann selon laquelle :

En gros, la recherche à l'échelle nanométrique concerne l'architecture moléculaire, la nanotechnologie vise le contrôle de cette architecture, et la nanoscience étudie les propriétés physiques qui en dépendent. Toutefois, si cette thèse est correcte, il apparaît que même la nanoscience n'est pas la « science » correctement ou traditionnellement parlant, et que même pour les nanosciences il n'y a pas de distinction entre une représentation théorique et une intervention technique, entre comprendre la nature et de la transformer. Plus adéquatement on devrait donc parler de NanoTechnoScience. (Loeve, Thèse 2009, p. 44).

Ces propos de Nordmann qui annoncent déjà notre dernier chapitre vu à travers le regard de Ian Hacking résument bien les thèmes qui guident notre présente réflexion sur la philosophie des nanotechnologies. Nous verrons comment les nanos se jouent des frontières et de nos traditions scientifiques. Mais commençons par tenter de définir les nanotechnologies en privilégiant la dimension historique, matérielle et instrumentale de cette activité en pleine effervescence.

### 2.5.1. Deux contraintes et trois paramètres pour une définition

Contrairement à beaucoup de spécialistes des nanotechnologies, nous ne nous contentons pas de constater ou d'adopter les définitions officielles ou les plus commodes dans l'état actuel de développement du domaine des nanos. Alors que le projet de Loeve est de mener des investigations sur la dimension technologique dans ce qui est qualifié de « nanotechnologique », notre intention est de déconstruire l'image galvaudée que l'on a voulu donner prématurément à une pratique largement autorisée par l'avènement du microscope à effet tunnel (1981), suivie de la prouesse de Don Eigler qui a réussi, huit ans plus tard, à manipuler individuellement des atomes de xénon pour former le sigle de son entreprise, IBM.

Le fil d'Ariane qui guide notre volonté de proposer une définition débarrassée, autant que faire se peut, de certains biais et enjeux, est bien déroulé par Sacha Loeve ci-après :

Les chercheurs en SHS n'ont pas à reprendre telles quelles les stratégies de démarcation des acteurs, sans quoi ils ne font qu'entretenir des mécanismes stratégiques qui ne sont pas les leurs. En revanche, il faut maintenir au plus haut les exigences épistémologiques de la définition des objets si l'on tient à établir un dialogue constructif avec les scientifiques. (Loeve, 2009, p. 53).

En fait, Loeve a pu décrypter un paramètre important de la prolifération des définitions qui, plutôt que de se contenter d'être descriptives, ont tendance à être prescriptives. Pour lui, ce que révèle l'analyse des définitions des nanos, c'est la récurrence des tentatives de les orienter plutôt que de se contenter de les décrire. En effet, selon lui, « les nanos incluent constitutivement et d'emblée leurs discours d'accompagnement, qui font par conséquent bien plus qu'« accompagner » les nanos. » (Loeve, 2009, p. 54). C'est pourquoi il est fort à propos dans les lignes qui suivent de travailler à une définition qui se veut plus descriptive que normative sans perdre de vue le fait que la normativité est souvent au cœur de la description.

Il va de soi que la tradition scientifique ne saurait se contenter du relativisme ou de l'indulgence dont rend compte la prolifération des définitions dans la

circonscription de l'un de ses domaines d'activité. La confusion orchestrée par les intérêts hétéroclites des acteurs et les enjeux d'envergure autour des nanos ne sauraient avoir raison d'une définition dépassionnée éloignée des coulisses des acteurs directement impliqués dans ce nouveau champ technoscientifique. À l'instar de Sacha Loeve, nous sommes préoccupés par les deux questions suivantes :

Comment s'en tenir à des définitions aussi larges et aussi plastiques ? Comment des scientifiques se satisfont-ils de définitions aussi peu scientifiques ? (Loeve, 2009, p. 41).

Voilà pourquoi nous avons jugé utile, d'une part, de remettre en cause cette situation favorable à la confusion afin de proposer une définition basée sur l'histoire de l'avènement des nanos que nous allons voir ; d'autre part, nous pensons qu'une définition crédible doit se démarquer de ce qui existait déjà avant l'avènement du nanomonde, notamment les microsciences et les microtechnologies qui ont inauguré l'ère de la miniaturisation technoscientifique au milieu du 20<sup>e</sup> siècle. En définitive, on ne saurait commettre d'amalgames entre miniaturisation et nanotechnologie, même si cette dernière relève du *top-down* ou « fabrication descendante ». Cela est bien illustré par les propos des Ratner ci-après lorsqu'ils soutiennent que « La nanofabrication *descendante* consiste à obtenir une petite structure à partir d'une grande. » (Ratner, 2003, p. 14). Ce que faisaient déjà les microtechnologies. Mais, ce qui est inouï, et que n'omettent pas de souligner nos deux auteurs, c'est qu'« inversement, la nanofabrication *ascendante* consiste à construire une nanostructure à partir d'atomes individuels. » (Ratner, 2003, p. 14).

Nous savons que deux éléments sont déterminants dans l'avènement des nanotechnologies. Le premier est un événement historico-technologique : la création du microscope à effet tunnel par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer en 1981 (à Rüschlikon, Zürich), ce qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1986. Le second est le basculement de la localisation des propriétés de la matière à cette échelle au cœur des lois de la mécanique quantique qui la régissent totalement désormais. De ce fait, toute définition désireuse d'échapper au piège des enjeux



doit, à notre sens, tenir compte de ces deux dimensions pour les deux raisons suivantes que nous tenons pour des contraintes :

- La mise au point de ce microscope à effet tunnel nous a permis d'avoir le premier contact matériel qui soit avec des objets à cette échelle, jusqu'ici chasse gardée de la mécanique et de la physique quantique. C'est le début, non seulement de l'observabilité des nano-objets, mais c'est aussi ce qui ouvre l'ère de leur manipulabilité plus ou moins directe par l'homme ainsi que leur contrôlabilité.
- L'accès à ce niveau de la matière ouvre un nouvel angle de l'univers quantique à la science et à la technologie avec les effets d'échelle propres à cette dimension qui conforte l'idée selon laquelle, « ce qui est à l'échelle nanométrique n'est pas simplement tout petit, c'est aussi et surtout quelque chose de différent dans la manière d'être tout petit. » (Ratner, 2003, p. 08).

Si nous tenons compte de ces deux points, nous pouvons proposer de définir les nanotechnologies, tout en les rebaptisant « nanotechnosciences », comme toute activité scientifiotechnologique visant, par la manipulation contrôlée, à connaître ou à concevoir des objets plus ou moins complexes à l'échelle de la nanophysique, et dont le moyen exclusif d'y parvenir, dans l'état actuel de nos connaissances et de nos technologies, est un microscope de la génération des microscopes à effet tunnel ou à force atomique (*Atomic Force Microscopy, AFM*). Par conséquent, faire œuvre de nanotechnologies requiert la conjonction de ces trois paramètres : l'« observabilité », la manipulabilité, la contrôlabilité.

De ce fait, l'observabilité qui garantit l'accessibilité visuelle, auditive ou tactile de l'objet aux chercheurs permet son identification et son examen critique. La manipulabilité autorise le maniement et la transformation de l'objet à l'échelle nanométrique en dépit du fossé entre les propriétés paradigmatiques nouvelles et celles qui ont servi de matrice principale à la science de l'origine à nos jours. La

contrôlabilité, enfin, au-delà de la vérifiabilité, est le travail de précision qui permet d'orienter, d'organiser, de structurer l'objet en décidant de sa configuration ou de sa reconfiguration malgré les effets quantiques, ou plutôt avec eux. Elle permet de déterminer les qualités et la forme de l'objet.

Ainsi les moyens privilégiés dont nous disposons actuellement afin de « nano-observer », nanomanipuler et contrôler les phénomènes à l'échelle du lilliputien sont les nanoscopes. Nous allons voir à présent de quoi il s'agit.

### 2.5.2. L'apport des nouveaux outils qui ont ouvert le champ des nanos

La plupart des philosophes, sociologues, chimistes et physiciens qui ont réfléchi sur les nanotechnologies reconnaissent l'importance capitale des instruments dans l'avènement et le développement de cette nouvelle activité scientifico-technologique. Le rôle capital joué par les instruments dans ce domaine a été bien compris par le physicien français Étienne Klein qui soutient sans détour qu'il n'y a pas de meilleure ligne de délimitation permettant de faire le distinguo entre le nano et le non-nano. C'est pourquoi, à son avis, « les critères de démarcation pertinents font plutôt appel au rôle de l'instrumentation, qui permet l'observation et l'ingénierie directes des molécules ou des atomes, aux propriétés inédites et parfois surprenantes des objets à l'échelle nanométrique. » (Klein, 2011, p. 39-40). En conséquence, il est assez largement convenu que le rôle de ces nouveaux instruments est d'autant plus déterminant qu'ils tiennent lieu de critère matériel de démarcation entre le nano et le reste de « l'infiniment petit » déjà bien connu par les chimistes.

Parmi les outils les plus connus pour observer et mesurer les nanostructures, rappelons que les microscopes à balayage sont parmi les premiers instruments à avoir été utilisés en nanosciences, la spectroscopie est l'étude du spectre des rayonnements lumineux émis, absorbés ou diffusés par un milieu matériel, elle est bien plus ancienne que les techniques des nanoscopes à balayage, l'électrochimie,

moyen par lequel l'on transforme des processus chimiques en courant électrique ou, au contraire, l'on produit des réactions chimiques à partir de courant électrique. À cette énumération, il faut ajouter le microscope électronique qui remplace la lumière utilisée en optique classique par des flux d'électrons. En vérité, les premiers instruments à balayage réellement efficaces qui ont été développés sont les *Scanning Tunneling Microscopy (STM)* ou nanoscope à effet tunnel dont nous avons parlé plus haut et à propos duquel Sacha Loeve rapportant la position du Prix Nobel de chimie de 1993, Karry Mulis, dans son étude du « concept de technologie à l'échelle des molécules machine » retiendra que « c'est le STM qui a tracé la ligne de partage entre le nano et le reste du tout petit, que la chimie appréhende, manipule et étudie depuis longtemps, mais de manière collective. » (Loeve, 2009, p. 45).

Afin de lever une équivoque, il ne serait pas superflu de rappeler que le choix du concept « nanotechnologies » plutôt que celui de « nanosciences » tient au fait que dans le champ des nanos on manipule pour comprendre à défaut de voir, tel que l'explicite Céline Lafontaine dans son ouvrage publié en 2010. Selon elle, en effet :

Contrairement à la conception courante de l'instrument comme simple prolongement des sens, l'instrumentation utilisée en nanotechnologies est indissociable d'une logique de contrôle et de manipulation. Puisque l'observation physique d'un atome est impossible, seules la manipulation des atomes et la modélisation informatique permettent de visualiser le phénomène. Le rapport fusionnel qui s'instaure entre perception et manipulation à l'échelle nanométrique participe d'une épistémologie proprement technoscientifique qu'on peut résumer par l'expression « voir, c'est faire ». (Lafontaine, 2010, p. 82).

Ainsi, les limites des capacités de visualisation et de contrôle des acteurs en salle blanche sont liées à celles de ces mêmes instruments qui leur permettent d'accéder à l'information à cette échelle. Du coup, toutes les propriétés ne sont effectivement pas contrôlées, puisque de l'aveu de ce chercheur en génie physique, « on ne peut pas les voir. » (Lafontaine, 2010, p. 82). Ainsi, on fait pour connaître et pour connaître, il faut « manipuler ». Cette exigence liée à la nature même de l'objet nanométrique justifie l'enchevêtrement inédit entre science et technologie. D'où ces mots de Céline Lafontaine :

La primauté épistémologique accordée à la manipulation atteste du développement d'un modèle technoscientifique où le *faire* a préséance sur le *connaître*. De fait, il n'est pas surprenant de constater que les frontières entre sciences et technologies sont, à l'échelle du nanomètre, fluides et changeantes. (Lafontaine, 2010, p. 83).

En conséquence, en plus d'être enchevêtrées, nanosciences et nanotechnologies ont des frontières plastiques difficiles, voire impossibles à circonscrire. Alors, très souvent, le terme nanotechnologie est hyperonyme de celui de nanoscience, car l'activité nanoscientifique est inséparable de celle nanotechnologique, le « voir » est toujours assujéti à la manipulation et au « faire ». Dans ce contexte, parler de « nanotechnoscience » ne serait pas qu'un simple jeu de mots, ou l'expression d'un penchant pour la néologie. Si une ligne de démarcation devait subsister, on la trouverait en aval de la pratique nanotechnologique, autrement dit, dans les résultats. Ainsi, selon qu'une activité de recherche aboutit à une application technologique ou une explication scientifique, on pourra utiliser ce fait comme critère de démarcation *a posteriori* afin de distinguer les deux domaines de recherche et retrouver ainsi, avec une certaine contrariété certes, nos repères traditionnels de clivage entre sciences et techniques. C'est dans la perspective de cette perturbation que Jean-Louis Pautrat prédisait, dans une plus large mesure, que « la société, elle, sera inévitablement perturbée par l'introduction des technologies de miniaturisation. » (Pautrat, 2002, p. 17). En fait, depuis leur naissance, les nanos n'ont fait que bousculer nos us scientificotechnologiques, à un tel point que certains parlent de seconde « révolution industrielle » et d'autres évoquent l'idée d'une « révolution scientifique ». L'examen de ces questions ne constitue pas l'objet de ce présent chapitre, mais nous pensons qu'elles méritent plus d'attention de la part des chercheurs. Cependant, qu'en est-il du changement d'échelle ?

### 2.5.3. Effets d'échelle, changements de propriétés et nanotechnoscience

Bien entendu, l'une des nouveautés ayant accompagné l'avènement des nanotechnologies est le passage de la science du paradigme de la macroscience à



l'univers quantique qui obéit à des règles bien différentes. De ce fait, tant qu'on ne fait qu'exploiter les propriétés de l'univers quantique dans l'optique des technologies du tout petit, on peut considérer que l'on est toujours dans le cadre de la miniaturisation que nous connaissons déjà avant l'avènement des nanos, ainsi que les microtechnologies savaient déjà le faire avec beaucoup de succès. Afin d'illustrer notre propos, référons-nous de nouveau à l'ouvrage *Les nanotechnologies : la révolution de demain* où, s'appuyant sur les propriétés de l'or, les auteurs nous fournissent l'illustration ci-dessous :

Imaginons, nous disent-ils, un lingot d'or de 1 m de côté. Découpons-le de moitié en largeur, hauteur et longueur. Cela donne huit petits cubes faisant chacun 50 cm de côté. Les propriétés de ces huit morceaux sont les mêmes que celles du cube initial : ils sont en or jaune, brillant et lourd, en métal ductile, conducteur d'électricité et avec le même point de fusion.

À présent, découpons de nouveau de moitié chaque nouveau morceau obtenu, cela donne huit petits cubes de 25 cm de côté. Rien n'a encore fondamentalement changé. Continuons l'opération de découpage pour obtenir des sections de l'ordre du centimètre, puis du millimètre, et enfin du micron : chaque minicube obtenu, invisible à l'œil nu (il faut recourir à des instruments d'optique), a toujours les mêmes propriétés chimiques que le cube de 1 m de côté. À l'échelle macroscopique, les propriétés chimiques et physiques d'un matériau, quelle que soit la matière (or, fer, plomb, plastique, glace ou cuivre), ne dépendent que de sa taille.

En revanche, à l'échelle nanométrique, tout change, même la couleur de l'or, son point de fusion et ses propriétés chimiques. Cela tient aux interactions qui, dès lors, s'effectuent entre les atomes constitutifs de l'or. Si celles-ci se neutralisent (en s'équilibrant) et annulent leurs effets au sein d'un morceau massif de métal, il en va différemment pour un morceau de taille nanométrique du même métal. (Ratner. 2003, p. 14).

La question est alors celle de la légitimité d'une définition des nanotechnologies qui ne tiendrait pas compte des observables ci-dessus évoqués. En tout état de cause, toute définition qui ne prendrait pas en considération ce dépassement de l'univers de la physique classique ne saurait tirer ses fondements des propriétés intrinsèques de la matière qu'elle se prévaut d'étudier ; car, à l'instar de Wautelet, nous savons que :

Du macro au nano on traverse deux limites physiques. Le problème est compliqué par le fait que : 1) ces limites ne sont pas abruptes ; 2) elles dépendent de l'effet considéré ; 3) elles sont fonction du ou des matériaux impliqués. Un prérequis à tout travail sur les nanotechnologies demande donc de comprendre comment les propriétés varient

avec l'échelle des dimensions. Pour cela, le recours aux lois d'échelles est d'une grande utilité. (Wautelet et al, 2006, p. 9).

Une telle assertion rend bien compte de la complexité de la tâche. En effet, quand on parle de physique macroscopique, il ne faut pas omettre le fait que quelques-unes des propriétés macros peuvent être interprétées par la physique quantique et s'expliquer dans la mécanique quantique. Mais les microtechnologies n'interviennent pas directement au cœur du « nanomonde », au niveau où les interactions se font selon l'électromagnétisme qui caractérise la taille nano, c'est-à-dire  $10^{-9}$ , ainsi que le permettent nos nouveaux instruments d'observation et de manipulation, les nanoscopes qui doivent composer avec les effets d'échelle. Pour Louis Laurent :

Les lois de la physique s'appliquent à toutes les échelles, mais leur importance relative dépend de la taille des objets considérés. À l'échelle macroscopique, c'est la physique classique qui domine. Les effets de la mécanique quantique, qui gère le comportement des particules élémentaires, sont alors imperceptibles (bien qu'ils existent puisque des phénomènes comme la conductivité électrique en dépendent). À l'échelle sub-atomique, c'est le contraire : la mécanique quantique prend le pas sur la physique classique. Or les objets nanométriques se situent en quelque sorte à la « frontière » entre ces deux échelles. C'est pourquoi, des effets dûs (*sic*) à la mécanique quantique se font parfois très présents... et surprennent notre intuition forgée dans le monde macroscopique. (Louis Laurent, 2007, p. 35-36).

La *National Nanotechnology Initiative (NNI)*, par la voix de Mihail Roco, dira à ce sujet que « le nanomètre (un milliardième de mètre) est un point magique de l'échelle des dimensions. Les nanostructures se situent entre ce que l'homme peut fabriquer de plus petit et les plus grandes molécules du monde vivant. » (Ratner, 2003, p. 9). Aussi, le changement de propriétés et le caractère incontournable des nanoscopes pourraient-ils être un double critère de démarcation possible entre le nano et le micro.

Cependant, la démarche définitionnelle des communautés scientifiques que rapportent, de façon précise et fort à propos, Lafontaine et Vinck nous semble poser un problème épistémologique, voire éthique, qui mérite un peu plus d'attention de la part des spécialistes des questions scientifiques en sciences humaines et

particulièrement en philosophie. Une des conséquences de cet amalgame est qu'experts et non-spécialistes en arrivent à insérer dans la définition de cette discipline une autre qui, dans le fond, n'a probablement qu'un seul lien avec celle-ci, la miniaturisation. Le problème ici est que l'on accepte de définir les nanotechnologies comme une partie des microtechnologies ou à en faire, purement et simplement, un synonyme. C'est l'un des mélanges de genres que nous avons voulu mettre en évidence tout en essayant de le juguler en proposant une démarche plus appropriée, épistémologiquement parlant, afin de transcender le problème des lois sociologiques qui prévalent dans la construction d'une définition des nanotechnologies fondée sur les acteurs.

En définitive, comme nous l'avons vu, la recherche des financements ainsi que leur abondance dans certains secteurs de la recherche académique, et pas dans d'autres, est en train de modifier durablement le paysage universitaire et d'installer une nébuleuse conceptuelle qu'exploitent tous les chercheurs en mal de financement et suffisamment réactifs pour attirer les finances privées et gouvernementales dans les laboratoires. Du coup, l'offre marketing l'emporte sur l'honnêteté et la rigueur intellectuelle des chercheurs. Dominique Vinck parlera de « marchandisation ». Il définit celle-ci comme l'« appropriation privée de la connaissance par la protection industrielle du dépôt de brevets, contrats spécifiant les termes d'un transfert ou d'un partage de connaissance et son espace de confidentialité ». Celle-ci devient l'une des préoccupations essentielles des laboratoires de recherche avec son pendant moins péjoratif, la valorisation qui prend le sens de « création de valeur économique » (Vinck, 2005, p. 73-91).

Ce qui se joue derrière ces querelles définitionnelles est la réalité d'une mutation de plus en plus perceptible dans nos univers académiques avec le développement de stratégies de survie ou d'expansion des équipes de recherches qui se répandent, avec en ligne de mire la poursuite ou l'initiation de certaines recherches scientifiques qui n'auraient pu se poursuivre ou avoir lieu sans ces stratagèmes des chercheurs relativement à la disponibilité des financements et à la pertinence des

projets pour lesquels ceux-ci sont octroyés. Ainsi, ces allocations ne dépendent plus exclusivement de la qualité des projets scientifiques. Ce sont plutôt ceux-ci qui se mettent au service des projets, industriels civils et/ou militaires, qui offrent les deniers selon des critères qui leur sont propres. D'où ce constat de Lafontaine faisant référence à la recherche canadienne dans ce domaine :

L'engouement suscité par la maîtrise de l'infiniment petit à l'échelle internationale a donné lieu à un repositionnement des secteurs de recherche afin qu'ils puissent bénéficier de la manne des subventions. Presque exclusivement dépendants des fonds publics, les chercheurs québécois et canadiens participent activement à ce redéploiement afin de s'assurer une place au soleil du nanomètre. (Lafontaine, 2010, p. 23).

Du coup, outre le caractère intégrateur des nanotechnologies, un certain nombre de re compositions des équipes de recherche et/ou la redéfinition de leurs domaines d'activité pourraient avoir un impact sur la configuration intrinsèque des équipes académiques. Cette reconfiguration à l'intérieur des sciences sera l'un des aspects importants de la révolution scientifique technologique annoncée. Pour Lafontaine, « au-delà de leurs multiples applications réelles ou virtuelles, les nanotechnologies annoncent non seulement une nouvelle façon de concevoir et de manipuler la matière, mais aussi un nouveau mode d'organisation de la recherche et du rapport entre science, économie et société. » (Lafontaine, 2010, p. 10).

Enfin, dans le but d'éviter toute équivocité liée aux facteurs exposés précédemment, nous avons décidé de retenir des critères plus « objectifs » et plus astreignants. Ceux-ci se déclinent en deux astreintes, comme nous l'avons vu précédemment. La première se base sur les instruments spécifiques qui nous permettent d'accéder à l'objet des nanotechnologies et qui n'existaient pas avant 1981, date de la découverte du microscope à effet tunnel. Et la seconde se base sur les propriétés intrinsèques de l'échelle  $10^{-9}$  dont Mihail Roco dit qu'elle se trouve à un niveau intermédiaire entre la taille des atomes ou des molécules isolées et celle des matériaux macroscopiques. Les nanotechnologies peuvent donc être définies selon ces deux caractères dont le premier permet l'observabilité ou l'accessibilité à l'objet



nanométrie rendue possible par les nouveaux instruments d'observation. Ce qui implique la manipulabilité qui ne saurait être possible sans la maîtrise du second, c'est-à-dire la prise en compte et la maîtrise des propriétés « rebelles » de la matière à cette échelle, d'où la contrôlabilité indissociable de la finesse des instruments et du changement (*switch*) nomologiques au niveau quantique.

Ainsi, pour nous, au vu des développements qui précèdent, une définition possible des nanotechnosciences, plutôt que des nanotechnologies, serait de les décrire comme toute activité à but scientifique ou technologique visant, par la manipulation contrôlée à l'échelle atomique ou moléculaire, à connaître, expliquer, prédire ou manufacturer des nano-objets plus ou moins complexes. Le moyen exclusif d'y parvenir, dans l'état actuel de nos connaissances et de nos technologies, est un instrument d'« observation haptique » et de « nanomanipulation » (Daston et Galison, 2012) de la génération du microscope à effet tunnel ou tout autre nanoscope de performance similaire ou supérieure. Cette définition, tout en tenant compte des préoccupations de John Cressler et Christian Joachim, s'inscrit dans la même optique rigoriste que celle résumée ci-après par Alfred Nordmann qui soutient que : « Grosso modo, la recherche à l'échelle nanométrique porte sur les architectures moléculaires, la *nanotechnologie* vise au contrôle de cette architecture, alors que la *nanoscience* étudie les propriétés physiques qui les constituent<sup>40</sup>. » Sa définition, admet-il, s'inspire de celle donnée par Cathy Murphy lors d'un atelier de travail scientifique (*Workshop*) sur le thème « *Reading Nanoscience* » tenu à l'Université de Caroline du Sud (*University of South Carolina*) en août 2002.

---

<sup>40</sup> Alfred Nordmann, « Molecular Disjunctions: Staking Claims at the Nanoscale », in D. Baird, A. Nordmann & J. Schummer (2004), *Discovering the Nanoscale*, IOS Press, Amsterdam, p. 51. Nordmann affirme la chose suivante : « Roughly speaking, *nanoscale research* concerns molecular architecture, *nanotechnology* aims for the control of this architecture, and *nanoscience* investigates the physical properties that depend on it. However, if the thesis is correct, it turns out that even nanoscience isn't "science" properly or traditionally speaking, and that even for nanoscience there is no distinction between theoretical representation and technical intervention, between understanding nature and transforming it. More properly one should therefore speak of NanoTechnoScience. » p. 51.

Une autre façon de rendre compte de l'enchevêtrement quasi consubstantiel entre science et technologie dans le nanomonde est, à l'instar de Gilbert Hottois, de le qualifier de « technoscientifique ». Afin de mieux coller à la nouvelle dimension dont il est question ici tout en la distinguant clairement de ce que fut l'interaction entre science et technologie ou technoscientifique avant l'avènement des technologies de l'infiniment petit, nous lui préférons le terme « nanotechnoscience » qui nous semble introduire la dimension supplémentaire radicalement nouvelle dans cette tradition interactionnelle. Ce néologisme, d'autres spécialistes des sciences humaines et sociales, à l'instar d'Alfred Nordmann et Astrid E. Schwarz, y ont déjà eu recours, nous l'avons vu. Mais, il ne désigne rien d'autre pour nous que la dimension technique et mathématique de la science à l'échelle moléculaire ou atomique. En conséquence, tout dispositif plus ou moins complexe issu de la manipulation contrôlée à cette échelle serait les nanotechnologies de même que toute loi ou théorie issue des résultats des travaux dans ce « nanounivers » ou « nanocosmos » relèverait des nanosciences.

Bien entendu, cette définition, tout en reflétant la mise en cause profonde des dichotomies traditionnelles entre nature et artifice, inorganique et organique, humain et machine, s'abstient de pousser la rigueur plus loin qu'il ne faudrait pour notre analyse. Cependant, nous concédons à Bernadette Bensaude-Vincent le fait que la technoscience soit bien plus « qu'un simple couplage de science et de technique ou qu'une subordination de la connaissance à des intérêts pratiques ou économiques. » (Bensaude-Vincent, 2009, p. 15). Pour elle, en effet, c'est dégager une vision d'ensemble de l'univers de la technoscience que de la considérer comme « (...) un processus historique qui transforme la nature et la société dans son ensemble en une vaste scène expérimentale. » (Bensaude-Vincent, 2009, p. 15). En ce qui nous concerne, nous nous contenterons d'examiner la question au travers de la vaste scène d'observation et de manipulation que représente l'univers au travers des nanoscopes. C'est sur ce terrain que nous chercherons à examiner la position de Kuhn en veillant à ne pas céder à une quelconque forme d'anachronisme.

Tout ceci étant, la définition que nous préconisons au milieu de cette inflation définitionnelle partage les approches de Joachim (2010) et Cressler (2009) qui, conscients de l'inconséquence de la création de nouveaux concepts pour désigner de vieilles réalités déjà conceptualisées, ont décidé soit de repréciser le contenu à admettre sous l'idée de nanotechnologie, c'est le cas du premier, soit de désigner différemment ce nouveau cadre, c'est ce que fait le second. Ainsi, en combinant les deux approches, nous préconisons une définition, non pas des nanotechnologies, mais de la nanotechnoscience. Par conséquent, selon nous : *la nanotechnoscience, consiste en une activité à visée scientifique ou technologique cherchant, par la manipulation contrôlée à l'échelle atomique ou moléculaire, à connaître, expliquer, prédire des phénomènes ou manufacturer des objets plus ou moins complexes afin de créer des structures ou des dispositifs à l'échelle nanométrique et dont le moyen exclusif d'y parvenir dans l'état actuel de nos connaissances et de nos technologies est un instrument de manipulation et d'« observation haptique » de la génération du microscope à effet tunnel ou tout autre nanoscope de performance égale ou supérieure à celui-ci.*

Cependant, pouvons-nous dire que l'une des philosophies des sciences que nous nous sommes proposé de tester serait suffisamment ouverte aux nanotechnosciences ? C'est ce que nous comptons mettre en lumière dans les chapitres qui suivent en commençant par interpellier le physicien et historien des sciences, Thomas Samuel Kuhn (1922-1996).

## 2.6. Conclusion

Enfin, pour répondre aux inquiétudes soulevées par Jean-Marc Lévy-Leblond au début de ce chapitre, il n'a pas de raison de s'inquiéter d'une science étouffée par la technique, soit parce qu'il n'en en jamais été autrement, si l'on en croit Bernadette Bensaude-Vincent, soit parce que cette interpénétration entre la science et la

technologie n'anéantit ni la première, ni la seconde. C'est dans ce sens qu'il faut comprendre ces mots de Giovanni Busino :

La technique est autonome et neutre comme n'importe quel autre phénomène social. Elle n'est guère plus déterministe que les autres modèles sociaux normatifs. Elle ne nous prive pas de la liberté d'agir; elle change uniquement l'étendue de notre responsabilité et enclenche de nouveaux systèmes de régulation et de contrôle social. Parler de déterminisme technologique, dire qu'une technique engendre une autre technique dans un processus sans fin, répéter qu'il y a une logique irrésistible du développement technologique, ce sont des hyperboles. Il est plus prudent d'affirmer qu'il s'agit des fruits de choix intentionnels, sociaux, politiques, culturels. (Busino, 1998, p. 95).

En effet, Busino, fidèle à l'idée que l'histoire des techniques montre que dans certaines sociétés la science et la technique se sont développées indépendamment l'une de l'autre, alors que dans d'autres la science et la technique se sont interpénétrées, dans les nôtres, elles sont tantôt unies, tantôt séparées. En ce qui nous concerne, nous estimons que l'union science-technique n'exclut pas leur distinction. Ces deux formes de cohabitation peuvent coexister sans que l'une n'ait raison de l'autre. (Busino, 1998, p. 94).

En définitive, au terme de cet examen que nous avons voulu assez détaillé, nous espérons avoir révélé le caractère paradigmatique de la miniaturisation et de la monumentalisation. En effet, au travers de ces deux entités opposées, mais qui peuvent être complémentaires, nous avons mis en évidence la pluralité des définitions que nous avons essayé de considérer selon les lignes de force qui s'en dégageaient.

Cependant, cette diversité, presque pathologique des définitions, nous a incités à aller chercher, au-delà de leurs manifestations discursives, les raisons de leur pluralité parfois inconciliable. Cette archéologie des définitions nous a poussés à dépouiller les enjeux qui souvent les sous-tendent, si elles n'en déterminent pas les points focaux. Nous avons, aussi, vu que cette problématique des enjeux a un impact direct sur la typologie des définitions. L'identification du problème de la prolifération des définitions en liaison avec la nature des enjeux nous inspire une



démarche différente susceptible de nous aider à éviter certains écueils de nature à biaiser la définition que nous voulions à l'abri de certaines influences douteuses.

Notre démarche nous a conduits à nous intéresser à la question de l'objectivité et de l'image des nanotechnologies, puis à la métaphysique posthumaniste qui informe cette nouvelle promesse « nanotechnoscientifique ». À l'issue de cette incursion au cœur d'une certaine philosophie des nanotechnologies, nous avons mis en avant un certain nombre de critères censés nous aider à mieux définir ce que l'on connaît bien maintenant sous la dénomination de « nanotechnologies », souvent avec la marque du pluriel.

Au cours de cet examen, nous avons décelé deux *contraintes*, qui nous paraissent être, en fait, des conditions *sine qua non* d'une bonne caractérisation de la nanotechnoscience. Il s'agit : de l'avènement du nanoscope et du basculement dans l'univers de la nanophysique.

Puis, viennent les *paramètres*. Ces derniers sont constitués par l'observabilité, la nanomanipulabilité, pour reprendre le concept de Daston et Galison, et enfin, la contrôlabilité. Ces derniers sont tous les trois indispensables, tant à la science qu'à la technologie, en général.

En tenant compte de tous ces facteurs et en les confrontant à la fois à la plupart des définitions des nanotechnologies ainsi qu'à ce que nous savons des phénomènes à cette échelle, nous n'avons d'autre choix que d'induire l'inexistence, au sens strict, de ce que l'on devrait prendre pour les « véritables » nanotechnologies. Ce constat alarmant nous impose une reconsidération de la question et une édulcoration des prétentions définitionnelles de certains acteurs. Ainsi, si nous convenons de la possibilité qui nous est offerte par les nanoscopes d'accéder, non pas seulement de façon optique, mais de manière à la fois virtuelle et tactile, aux nanomatériaux, nous pensons que ni la nanoscience, ni la nanotechnologie ne sont présentement des disciplines tout à fait constituées, élaborées, opératoires. Autrement dit, ce ne sont

pas encore des paradigmes, au sens de Kuhn, mais elles pourraient bien être considérées comme des « programmes de recherche » prometteurs, au sens lakatosien. Ces points seront développés, bien entendu, à la suite de la mise à l'épreuve de la théorie kuhnienne à laquelle nous allons procéder.

En revanche, si l'on ne peut pas parler rigoureusement de nanoscience ou de nanotechnologie, il est possible de désigner cet espace de recherche et développement derrière les nanoscopes comme nanotechnoscientifique. C'est l'attitude que nous adopterons désormais avant de soumettre les nanotechnosciences au regard de la théorie des paradigmes, tout en gardant à l'esprit cet aphorisme de Nietzsche qui faisait dire à Zarathoustra que si l'on plonge trop longtemps son regard dans l'abîme, l'abîme nous regarde aussi.

### CHAPITRE III

#### THÉORIE DES PARADIGMES ET NANOTECHNOSCIENCES

Au vu de ce qui précède, se questionner sur la compatibilité d'une épistémologie donnée avec une pratique sociale quelconque revient à s'interroger sur la scientificité de cette pratique. En effet, les philosophies de Kuhn, Lakatos, Robert et Hacking que nous allons examiner portent toutes sur la science. L'on peut même dire que ce sont des théories des sciences. Or, si ce sont des réflexions sur ces dernières, il ne sera pertinent de leur soumettre les nanotechnologies que si celles-ci sont une science ou tout au moins en présentent les caractéristiques. Mais nous avons vu qu'à moins de souscrire à l'abus de langage généralisé qui pousse certains experts et dilettantes à nommer « nanotechnologie » au singulier ou au pluriel tout ce qui touche d'une façon ou d'une autre le nanomètre, ce terme désigne en fait toute activité scientifiotechnologique se déroulant au cœur de l'échelle nanométrique par le truchement du microscope à effet tunnel ou de tout autre nanoscope. Ainsi, si ce n'est l'activité désignée par le terme « nanotechnologie » qui est impropre, c'est tout au moins le concept lui-même qui évoque dans les esprits la technologie à l'échelle nanométrique sans la recouvrir pleinement. C'est pourquoi nous avons préféré le néologisme « nanotechnoscience » à celui de « nanotechnologie », habituellement utilisé, et que nous destinons à un autre usage plus conforme à l'intuition et au parallélisme des formes que nous avons essayé de respecter dans la reconstruction conceptuelle à laquelle nous nous sommes livrés.

En conséquence, notre tentative ici, après la présentation-rappel de la théorie des paradigmes de Kuhn, consistera à déterminer la place de la technologie dans sa conception paradigmatique afin de voir si, en l'appliquant au concept technoscientifique de ce que nous appelons nanotechnoscience, un compromis est

possible. Rappelons cependant, comme nous l'avons annoncé dans l'introduction, que le sens que nous donnons ici au concept de technologie n'est pas conventionnel. Il vise à englober les différentes applications que son activité rend possibles, qu'elles soient théoriques ou pratiques. Pour nous, les réalisations dites technologiques sont des moyens qui peuvent servir autant le développement scientifique que celui de la société. Celles-ci peuvent se décliner sous les noms d'instruments, d'appareils, d'outils, ou même de dispositifs techniques ou technologiques et opérer à différents niveaux de l'activité scientifique ou socio-politico-économique. Nous nous référons donc ici à la nature « technologiquement chargée » des instruments, sachant que ceux-ci peuvent être immatériels, seule leur matérialité retiendra notre attention dans les prochains chapitres. Ainsi, à défaut d'une association raisonnable entre le théorique et le technologique qui permettrait d'envisager la philosophie des sciences de Kuhn comme une philosophie de la nanotechnoscience, nous devons prendre en considération les alternatives portées par les philosophes des sciences comme Lakatos, Robert et Hacking que nous ferons intervenir dans ce débat après lui. Dans cette optique, nous projetons d'examiner la théorie des paradigmes de Kuhn dans ses méandres subtils, complexifiée par la difficulté de celui-ci à assigner une place désignée au technologique. Puis nous ferons suivre cette présentation par sa mise à l'épreuve de la technoscience, avant de considérer les limites de cette approche paradigmatique face aux nanotechnosciences.

### 3.1. La théorie des paradigmes de Kuhn

Si l'on en croit Kuhn lui-même, la meilleure entrée par laquelle on doit examiner la question des paradigmes est l'examen de la notion de communauté scientifique. Ainsi, par souci de fidélité à cette recommandation de Thomas Samuel Kuhn qui dit que « les communautés scientifiques peuvent et doivent être isolées sans recours



préalable à des paradigmes : ceux-ci peuvent être découverts ensuite à l'examen détaillé du comportement des membres d'une communauté donnée. » (Kuhn, 1983, Postface 1969, p. 240). C'est donc la communauté scientifique qui doit permettre de définir le paradigme et non l'inverse. Celle-ci, selon Kuhn, se compose de ceux qui pratiquent une certaine spécialité scientifique. Aussi ces derniers ont-ils une formation et une initiation professionnelles semblables, à un degré inégalé dans la plupart des autres disciplines, ce qui fait qu'ils ont assimilé la même littérature technique et en ont reçu dans l'ensemble le même enseignement. Pour l'historien des sciences, « les limites de cette littérature standard marquent habituellement les limites d'un domaine scientifique, et chaque communauté scientifique a d'ordinaire son domaine propre. » (Kuhn, 1983, p. 241).

C'est donc l'activité même de la communauté scientifique qui permet de circonscrire un paradigme donné. Cette recommandation de Kuhn donne bon espoir quant à notre volonté de circonscrire le paradigme nanotechnoscientifique afin de lui trouver une place dans la théorie des communautés scientifiques du philosophe des sciences. Mais auparavant, intéressons-nous à la période préparadigmatique. Que se passe-t-il avant le paradigme ? Rappelons-nous ces propos de Kuhn sur lesquels nous reviendrons :

Une fois qu'on a trouvé un premier paradigme au travers duquel considérer la nature, il n'est plus question d'effectuer une recherche en l'absence de tout paradigme. Rejeter un paradigme sans lui en substituer simultanément un autre, c'est rejeter la science elle-même. C'est un acte qui déconsidère non le paradigme, mais l'homme. Celui-ci apparaîtra inévitablement à ses collègues comme « l'ouvrier qui s'en prend à ses outils. » (Kuhn, 1983, p. 117).

### 3.1.1. Préparadigme et paradigme

#### 3.1.1.1. La période préparadigmatique

Que pouvons-nous dire de la période qui précède la découverte de ce « premier paradigme » ? En fait, Kuhn ne parle pas vraiment de préparadigme, mais plutôt de « période antérieure » (Kuhn, 1983, p. 78) à la formation d'un paradigme. Cette

négligence de la période préparadigmatique est peut-être liée non seulement à la nature omniprésente du paradigme, mais aussi à son caractère nécessaire. En effet, pour Kuhn, la science normale ne peut avancer sans règles qu'aussi longtemps que le groupe scientifique accepte les diverses solutions déjà mises au point en réponse aux problèmes posés. Dans un tel contexte, Kuhn considère qu'il serait normal que les règles deviennent moins importantes et que le manque d'intérêt qui les entoure habituellement s'évanouisse dès que les paradigmes ou les modèles semblent moins sûrs. Selon lui, c'est exactement ce qui se produit. Ainsi, ce qu'il appelle « la période antérieure à la formation d'un paradigme » (Kuhn, 1983, p. 77) se définirait par des discussions fréquentes et profondes sur les méthodes légitimes, les problèmes et les solutions acceptables, bien que pour Kuhn cela serve plus à définir des écoles qu'à rallier l'unanimité. Afin d'illustrer son propos, il rapporte ce qui suit :

Nous avons déjà noté certaines de ces discussions en optique et en électricité, et leur rôle a été plus grand encore dans le développement de la chimie au XVII<sup>e</sup> siècle et de la géologie au début du XIX<sup>e</sup>. D'ailleurs, les discussions de ce genre ne disparaissent pas une fois pour toutes avec l'apparition du paradigme. Bien qu'elles soient presque inexistantes durant les périodes de science normale, elles se reproduisent régulièrement juste avant et pendant les révolutions scientifiques, aux moments où les paradigmes sont attaqués et susceptibles de changer. Le passage de la mécanique newtonienne à celle des quanta a fait naître de nombreuses discussions sur la nature et les normes de la physique ; certaines durent toujours. Il y a encore des savants qui peuvent se rappeler les discussions si vives engendrées par la théorie électromagnétique de Maxwell et par la mécanique statistique. Et plus tôt encore, l'assimilation des mécaniques de Galilée et de Newton donna lieu à une série particulièrement célèbre de débats avec les aristotéliens, les cartésiens et les leibniziens sur les normes admissibles en science. Bref, quand les scientifiques ne s'entendent pas pour admettre que les problèmes fondamentaux de leur domaine ont été résolus, la recherche des règles assume une fonction qu'elle ne possède pas d'ordinaire. Tandis qu'aussi longtemps que les paradigmes restent sûrs, ils peuvent fonctionner sans qu'il soit besoin de s'entendre sur leur rationalisation, ou même sans qu'on tente de les rationaliser du tout. (Kuhn, 1983, p. 78-79).

De l'analyse de ce passage de *La Structure des révolutions scientifiques*, il ressort que ce que Kuhn appelle « période antérieure au paradigme » peut aisément se confondre avec un moment interparadigmatique qui se caractériserait par une sorte d'instabilité de la transition d'un paradigme vers un autre que l'on cherche à établir<sup>41</sup>.

<sup>41</sup> Rappelons que pour Kuhn : « Une fois qu'on a trouvé un premier paradigme au travers duquel considérer la nature, il n'est plus question d'effectuer une recherche en l'absence de tout paradigme. Rejeter un paradigme sans lui en substituer un autre, c'est rejeter la science elle-même. C'est un acte

Du coup, le préparadigme ou « période antérieure » n'est pas l'antéparadigme que l'on aurait pu imaginer. Il ne serait pas tout à fait un moment initial, une période originelle hors de tout paradigme et antérieure au premier paradigme. Cependant, à la décharge de Kuhn, il est possible de lui concéder qu'il reconnaît que sa distinction entre les périodes précédant et suivant l'établissement du paradigme dans le développement d'une science est beaucoup trop schématique et que chacune des écoles dont la concurrence caractérise la période antérieure est guidée par quelque chose qui ressemble beaucoup à un paradigme, même s'il peut y avoir de rares circonstances où deux paradigmes pourraient coexister en paix durant la période postérieure. En effet, selon Kuhn, la simple existence d'un paradigme n'est pas un critère suffisant pour que l'on trouve la transition évolutive (Kuhn, 1983, p. 12-13). Ainsi, non seulement le préparadigme pourrait avoir un soubassement ou une portée paradigmatique, mais de plus il n'aboutit pas nécessairement à un paradigme nouveau dont il aura été le passage évolutif.

De ce fait, même si le texte de Kuhn n'interdit pas que le préparadigme soit un moment primordial précédant l'avènement du paradigme, il semble davantage le concevoir comme une phase transitoire qui pourrait parfaitement correspondre à la crise qui, presque toujours, succède à un paradigme dégénéré tout en précédant un paradigme émergent. En effet, pour Kuhn, la crise est synonyme d'obligation de renouvellement des outils de la communauté scientifique. Ainsi soutient-il :

Les philosophes des sciences ont souvent démontré que plusieurs constructions théoriques peuvent toujours être échafaudées pour une collection de faits donnée. L'histoire des sciences indique, en particulier aux premiers stades de développement d'un nouveau paradigme, qu'il n'est pas très difficile d'imaginer des alternatives de ce genre. Mais il est rare que les savants cherchent à inventer ces solutions de rechange en dehors des étapes de développement de leur science qui précèdent la formation du paradigme et des moments très spéciaux de son évolution subséquente. Aussi longtemps que les outils fournis par un paradigme se montrent capables de résoudre les problèmes qu'il définit, la science se développe plus vite et pénètre plus profondément les faits en employant ces outils avec confiance. La raison en est claire. Il en est des sciences comme de l'industrie - le renouvellement des outils est un luxe

---

qui déconsidère non le paradigme mais l'homme. Celui-ci apparaîtra inévitablement à ses collègues comme « l'ouvrier qui s'en prend à ses outils ». » Kuhn (1983, p. 117).

qui doit être réservé aux circonstances qui l'exigent. La crise signifie qu'on se trouve devant l'obligation de renouveler les outils. (Kuhn, 1983, p. 113).

C'est pourquoi, en plus de la rareté des intermédiaires où les savants cherchent à inventer des solutions de rechange hors des sentiers battus du développement de leur science précédant la formation du nouveau paradigme et des moments très spéciaux de son évolution subséquente, l'obligation du renouvellement des outils se combine parfaitement bien avec les joutes de la période antérieure à la formation d'un paradigme « ... régulièrement marquée par des discussions fréquentes et profondes sur les méthodes légitimes, les problèmes, les solutions acceptables (...). » (Kuhn, 1983, p. 77).

En définitive, on peut dire que la crise tout comme la période antérieure à un nouveau paradigme sont des moments de liberté presque totale dans l'histoire des scientifiques où ces derniers recourent beaucoup à leur imagination et à la philosophie afin d'éprouver la créativité dont ils ont besoin pour résoudre le problème à l'origine de la crise et poser les jalons d'un nouveau paradigme. Mais pourquoi le paradigme est-il si important dans la pensée de Kuhn ?

### 3.1.1.2. Le règne du paradigme

Commençons notre propos par l'examen de cette notion de communauté scientifique, comme nous l'avons annoncé au début du point précédent. Rappelons que la communauté scientifique, telle que Kuhn l'entend, est composée de ceux qui pratiquent une certaine spécialité scientifique et qui ont une formation et une initiation professionnelles semblables à un degré inégalé dans la plupart des autres disciplines. Elle est constituée de spécialistes qui ont assimilé la même littérature technique et en ont retiré, globalement, le même enseignement. Les limites de cette littérature standard marquent habituellement les limites d'un domaine scientifique, et chaque communauté scientifique a d'ordinaire son domaine propre (Kuhn, 1983, Postface 1969, p. 240). C'est donc l'activité même de la communauté scientifique qui permet de circonscrire un paradigme donné. En effet, les membres d'un groupe



scientifique donné se considèrent et sont considérés comme les seuls responsables de la poursuite d'un ensemble d'objectifs qui leur sont communs et qui englobent la formation de leurs successeurs. Kuhn, dans *La tension essentielle*, précise la nature de la communauté scientifique en ces termes :

Dans mon livre la *Structure des révolutions scientifiques*, j'identifie et différencie les communautés scientifiques par les sujets dont elles s'occupent. C'est là sous-entendre que des termes comme « optique physique », « électricité », ou « chaleur », par exemple, peuvent servir à désigner des communautés scientifiques particulières, uniquement parce qu'ils désignent des sujets de recherche (Kuhn, 1983, Postface 1969, p. 240).

En conséquence, l'idée traditionnelle d'« une méthode heuristique qui permettrait à l'individu qui s'y conformerait de produire une juste connaissance » ne saurait prospérer dans la perspective ouverte par Kuhn. Aussi dira-t-il à ce propos : « j'ai essayé au contraire d'insister sur le fait que bien que la science soit pratiquée par des individus, la connaissance scientifique est intrinsèquement un produit du *groupe*, si bien que ni son efficacité particulière ni la manière dont elle se développe ne peuvent être comprises sans référence à la nature spéciale des groupes qui la produisent. » (Kuhn, 1990, p. 26). Ainsi, de façon tout à fait conséquente, il reconnaît la nature sociologique de sa démarche tout en se démarquant de tout sociologisme, concédant que son « travail a été profondément sociologique, mais pas d'une manière qui permette de séparer ce sujet de l'épistémologie. » (Kuhn, 1990, p. 26). Ainsi, pour être membre d'une communauté scientifique, il faut remplir les critères suivants : (1) on doit s'occuper de résoudre des problèmes concernant le comportement de la nature, (2) les problèmes sur lesquels on travaille doivent être des problèmes de détail, même si l'intérêt que l'on a à l'égard de la nature est global par sa portée, (3) enfin, les solutions qui satisfont l'homme de science ne doivent pas être uniquement personnelles ; il faut qu'elles soient acceptées par un groupe nombreux. Comme le précise Kuhn :

Ce groupe ne peut cependant pas être tiré au hasard de la société dans son ensemble, c'est plutôt le cercle bien défini des spécialistes ayant la même activité professionnelle. L'une des règles les plus strictes, quoique non écrites, de la vie scientifique est l'interdiction de faire appel, en matière de science, aux chefs de l'État ou à la masse du public. La reconnaissance d'un groupe professionnel seul compétent

et accepté comme arbitre exclusif des réalisations professionnelles a d'autres conséquences. Les membres du groupe, en tant qu'individus et en vertu de leur formation et de leur expérience commune, doivent être considérés comme les seuls connaisseurs des règles du jeu ou d'un critère équivalent de jugement sans équivoque. Douter de ces critères communs d'évaluations reviendrait à admettre l'existence de critères incompatibles de la réussite scientifique. Ce qui soulèverait inévitablement la question de l'unité de la vérité dans les sciences. (Kuhn, 1983, p. 230).

L'avènement de la nanotechnoscience discrédite la compétence exclusive des spécialistes d'un groupe donné à jouer le rôle d'arbitre unique. L'étendue du cercle des compétents défini par le philosophe états-unien n'est plus la même. Il demeure, en revanche, que les critères de ces communautés ne sauraient être incompatibles sous peine d'incommensurabilité et ils ne sauraient mettre en question le principe de « L'unité de la vérité dans les sciences » sous peine de favoriser « l'anarchisme théorique » préconisé par Paul Feyerabend (1979). Dans le mémoire de DEA<sup>42</sup> que nous avons soutenu en 2001, nous défendions l'idée que les frontières de l'Université comme celles de la communauté scientifique ne sont jamais des frontières nationales puisque la première comme la deuxième sont les mêmes partout. Elles transcendent les frontières, même si elles ne les effacent pas. Telle est la garantie de leur efficacité. Il nous semble que la même analogie peut s'appliquer aux nanotechnosciences telles qu'elles se sont développées depuis l'avènement du microscope à effet tunnel.

Notons que la composition des équipes travaillant dans le champ des nanotechnosciences est bien plus hétéroclite que le cercle de spécialistes auquel Kuhn fait allusion ici. En effet, celles-ci sont loin de regrouper des acteurs « ayant la même activité professionnelle. » Cette entorse à la théorie des « communautés scientifiques » de l'historien des sciences du *MIT* pourrait avoir pour conséquence de ruiner ses conclusions en élargissant la portée des groupes professionnels compétents. Dans cette optique, les membres d'un seul groupe ne pourraient plus prétendre détenir la compétence exclusive des réalisations professionnelles de leurs

---

<sup>42</sup> Thierno Guèye, mémoire de DEA (Diplôme d'Études Approfondies) 2001 [équivalent de la maîtrise au Québec], *Communautés scientifiques et paradigmes : l'idée de communautés scientifiques* que nous avons soutenu en juillet 2001, à l'université Cheikh Anta Diop de Dakar sous la direction du professeur Souleymane Bachir Diagne.

membres puisque les nanotechnoscientifiques ne seraient pas issues de la même matrice disciplinaire. Une telle possibilité pourrait mettre en cause la thèse de Kuhn. Nous y reviendrons plus amplement dans notre dernier sous-chapitre (3.3).

Nous pensons que la science que nous avons tendance à figer se caractérise aussi par son dynamisme, mais nous la figeons bien souvent pour mieux l'appréhender, au risque d'en parler comme d'une photographie antidatée plutôt que comme le film qu'elle est. Une fois de plus, l'opposition entre le devenir perpétuel d'Héraclite qui considérerait qu'on ne pouvait pas se baigner deux fois dans le même fleuve et l'immobilisme, voire l'impossibilité du discours de Parménide qui estimait que de l'Être on ne pouvait rien affirmer en dehors du fait qu'il soit, se rejoue ici d'une certaine manière. Transcender les frontières sans les effacer, n'est-ce pas précisément ce à quoi nous assistons dès que l'on parle de nanotechnologies ou de nanotechnosciences ? Cette persistance de la frontière comme repère et non plus comme limite préfigure, du moins l'espérons-nous, l'avenir d'un nouvel humanisme, et non d'un posthumanisme ou d'un transhumanisme, sous-jacent à une telle évolution qui mettrait nos différences au cœur de notre estime mutuelle et de nos exigences. De ce fait, la nécessité des frontières pourrait être posée comme une condition nécessaire pour leur dépassement et pour le progrès, mais plus comme une raison d'enfermement et d'exclusion.

Consubstantiellement lié à la communauté scientifique, le « paradigme » se définit ainsi comme un champ de rationalité qui utilise un cadre conceptuel, « une vision du monde » (Kuhn, 1983, partie de l'intitulé du chap. 9, p. 157 à 188. et p. 199), une manière de penser. Les paradigmes sont « les découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions » (Kuhn, 1983, p. 11). Thomas Kuhn identifie ces problèmes à de simples « énigmes » quand elles peuvent se corriger dans le cadre du dogme ou du savoir-faire des scientifiques ou des savants. Ainsi, l'énigme n'aboutit pas au rejet du paradigme en vigueur ou à sa mise en cause. L'« anomalie » par contre peut bouleverser un cadre de rationalité donné et

déboucher sur une crise du système. C'est alors à l'occasion d'une telle anomalie que la « science normale », qui ne se propose pas de découvrir des nouveautés théoriques ou factuelles et qui n'en découvre pas, atteint ses limites. En effet, l'activité exclusive de la science normale est de résoudre des énigmes. Son but est d'étendre régulièrement en portée et en précision la connaissance scientifique rendue possible par un paradigme. L'énigme, par contre, peut être considérée, dans certains cas, comme un contre-exemple et devenir source de crise. Pour Kuhn, face à une anomalie ou à une crise, les scientifiques adoptent une attitude différente à l'égard des paradigmes existants et la nature de leurs recherches change en conséquence (Kuhn, 1983, p. 132). Cette attitude traduit le passage de la recherche normale à la « science extraordinaire ». Ainsi, les théories spéculatives qu'ils imaginent pourront ouvrir un nouveau paradigme en cas de succès ; sinon, c'est le paradigme existant qui est conservé. En effet, l'apparition d'une crise ne transforme pas immédiatement une énigme en contre-exemple.

On peut cependant noter différents symptômes annonçant la crise, notamment l'incapacité de l'activité technique normale à résoudre des énigmes. La prolifération de versions différentes d'une théorie est aussi un élément annonciateur de problèmes sérieux rencontrés par la recherche normale. La crise a donc un caractère symptomatique. Selon Kuhn, « décider de rejeter un paradigme est toujours simultanément décider d'en accepter un autre (...) ». Le fait est que le rejet d'un paradigme est toujours favorisé par une crise ; alors que la décision d'en adopter un autre rend compte de l'accomplissement de la révolution. Celle-ci se traduit par un changement total du langage, de la structure des problèmes ou des normes de résolution des problèmes de la science normale. Cette renonciation au paradigme en crise est telle que, la révolution une fois effectuée, s'instaure une incommensurabilité fondamentale entre le nouveau paradigme et l'ancien. Ainsi, les termes, les concepts et les expériences anciens se trouvent les uns par rapport aux autres dans une nouvelle dynamique interactionnelle. D'où les « malentendus entre les écoles concurrentes » (Kuhn, 1983, p. 205), voire l'impossibilité même de s'entendre. En effet, de l'avis de Kuhn :



Deux hommes qui perçoivent différemment la même situation, mais emploient néanmoins le même vocabulaire pour en discuter, utilisent forcément les mots différemment. C'est-à-dire qu'ils discutent à partir de ce que j'ai appelé des points de vue incommensurables. Comment peuvent-ils espérer communiquer et encore moins se persuader ? (Kuhn, 1983, postface, p. 271).

Comment concevrons-nous alors le progrès scientifique face à cette immuabilité affirmée des paradigmes ? Nous avons souvent tendance à ne définir la science que relativement au progrès, or celui-ci, comme caractéristique fondamentale de la science, peut s'entendre de deux manières. En effet, quand le paradigme ne souffre d'aucune crise et que l'activité normale du groupe qui s'adonne à la recherche se déroule correctement, le progrès dans ce cadre est facilement perceptible. Il en découle une efficacité croissante ainsi qu'une plus grande compétence du groupe. À ce propos, Thomas Kuhn dira au chapitre XII de *La structure des révolutions scientifiques* que dans son état normal, un groupe scientifique est un instrument extrêmement efficace pour résoudre les problèmes ou les énigmes que définissent ses paradigmes. « Et le résultat de cette efficacité doit inévitablement être un progrès. » (Kuhn, 1983, p. 227).

Le premier aspect du progrès que nous venons d'exposer est bien celui qui s'effectue dans le cadre exclusif de la science normale. L'autre type de progrès, en revanche, se réalise hors des sentiers battus de l'activité normale de recherche. Il est accompli par la « science extraordinaire ». Il semble que le progrès dans ce cas soit concomitant aux révolutions scientifiques. Autrement dit, le nombre et l'importance des révolutions seraient la mesure du progrès scientifique. En effet, toute révolution se termine toujours par la victoire de l'un des deux camps en compétition sur l'autre. Ce triomphe apparaît comme un progrès aux yeux des tenants du paradigme qui a fini par s'imposer. Selon Isabelle Stengers, la notion de « révolution paradigmatique », à la suite de laquelle un paradigme en remplace un autre, convenait parfaitement aux scientifiques pour raconter l'histoire de leur discipline. Renforcés par cet aveu, nous considérerons le processus de développement de la science kuhnienne comme une juxtaposition de paradigmes.

La spécialisation constitue un autre signe de la croissance du savoir scientifique. Aussi, quelques vieux problèmes sont-ils parfois expulsés des activités des chercheurs. Il s'y ajoute une restriction des échanges possibles avec les autres groupes, scientifiques ou non. Ces facteurs traduisent ainsi l'augmentation du degré de spécialisation d'un groupe donné. C'est ainsi que la science croît en profondeur et pas nécessairement en étendue. Ce type d'extension du savoir scientifique se manifeste plutôt par la diversification des spécialités que par la plus grande portée d'une seule discipline. Par ailleurs, la pérennité et la précision des solutions sont garanties par la vigilance et la compétence propres à la nature des groupes. Précisons, toujours dans la ligne de l'analyse de Kuhn, que le progrès scientifique n'est pas téléologique, il ne vise aucun but précis. Cette conception de la science est, peut-on dire, évolutionniste. Elle demeure compatible avec une observation minutieuse de certaines activités scientifiques, certes, mais pour ce qui est de l'activité nanotechnoscientifique, ce n'est pas gagné. En effet, des questions touchant à la disciplinarité qui impose des frontières, à la place de la technologie dans la science et à l'autonomie nécessaire des communautés scientifiques, restent posées dès que l'on essaie d'étendre la théorie de Kuhn aux nanotechnosciences, à moins que ce nouveau champ de recherche ne soit compatible avec la période postparadigmatique. L'examen de cette hypothèse sera l'objet de notre prochain point.

### 3.1.2. La phase postparadigmatique, prélude du progrès

Nous qualifions de « postparadigmatique » cette période d'incertitude qui défait la science normale en portant en elle à la fois les germes de sa consolidation et ceux de sa perte. Cette phase se caractérise par l'« énigme » que l'on pourrait qualifier de pernicieuse parce que capable de révéler une « anomalie » apte à conduire à une « crise » susceptible d'être fatale au « paradigme » qui en a permis l'émergence. La particularité de cette phase est qu'elle caractérise la fin de la vie d'un paradigme et qu'elle est la condition *sine qua non* de l'adoption d'un nouveau paradigme.

En fait, la phase que nous qualifions ici de postparadigmatique est précédée d'une période de recherche normale cumulative. Selon Kuhn, « La recherche normale qui, elle, est cumulative, doit son succès au fait que les scientifiques peuvent régulièrement choisir des problèmes susceptibles d'être résolus en s'appuyant sur des concepts et des techniques instrumentales proches de ceux qu'ils connaissent déjà. » (Kuhn, 1983, p. 139). Il en déduit la vanité de tout désir de ne s'attaquer qu'à des problèmes utiles, sans considérer leurs rapports avec le savoir et les techniques existants. En effet, une telle démarche aurait pour fâcheuse conséquence d'inhiber très facilement le développement scientifique. C'est pourquoi, de son avis :

Le savant qui s'efforce de résoudre un problème défini par le savoir et les techniques existants ne cherche pas simplement au hasard autour de lui. Il sait ce qu'il veut réaliser ; il conçoit son appareillage et oriente ses réflexions en conséquence. Une nouveauté inattendue, une découverte nouvelle ne peuvent apparaître que dans la mesure où ce qu'il attend de la nature et de ses instruments se trouve démenti et l'importance de la découverte qui en résulte sera souvent proportionnelle à l'étendue et la ténacité de l'anomalie qui l'a annoncée. Donc, de toute évidence, il faut bien qu'il y ait conflit entre le paradigme qui a permis d'apercevoir l'anomalie et celui qui fera d'elle un phénomène conforme à la loi. (Kuhn, 1983, p. 139).

Cette évolution dans l'ordre du paradigme montre qu'à partir du moment où l'activité scientifique se déroule dans le cadre strict d'un paradigme, il n'y a plus vraiment de découverte tant que l'on n'a pas rencontré une anomalie. Autrement dit, tant que l'on n'a pas le sentiment que « la nature, d'une manière ou d'une autre, contredit les résultats attendus dans le cadre du paradigme qui gouverne la science normale. » (Kuhn, 1983, p. 83). Ainsi, l'exploration plus ou moins prolongée du domaine de l'anomalie permet de clore l'incident si elle aboutit à un réajustement de la théorie du paradigme qui permettrait la normalisation du phénomène anormal qui deviendrait de ce fait une manifestation attendue. C'est pourquoi « l'assimilation d'un nouveau type de faits est donc beaucoup plus qu'un complément qui s'ajouterait simplement à la théorie, et jusqu'à ce que le réajustement qu'elle exige soit achevé – jusqu'à ce que l'homme de science ait appris à voir la nature d'une manière différente –, le fait nouveau n'est pas tout à fait un fait scientifique. » (Kuhn, 1983, p. 83).

Du coup, adhérer à un paradigme devient la condition *sine qua non* de la science normale ou de la science tout court. Cette adhésion doit s'étendre à des domaines particuliers et à des degrés de précision qui n'ont pas encore été pleinement reconnus. Cependant, outre la science normale, la science extraordinaire aussi dépend du paradigme. Dans la conception kuhnienne, si la théorie existante ne lie le scientifique qu'en ce qui concerne les applications existantes, alors il n'y aura ni surprises, ni anomalies, ni crises. « Or celles-ci sont justement les poteaux indicateurs qui montrent le chemin vers la science extraordinaire. » (Kuhn, 1983, p. 144). À toutes fins utiles, la valeur d'un phénomène nouveau se mesure à son assise paradigmatique. Ce qui fait dire à Kuhn que si la découverte de l'oxygène n'avait pas été partie intégrante de l'apparition d'un nouveau paradigme en chimie, le problème de priorité n'aurait jamais semblé aussi important. « Dans ce cas comme dans d'autres, la valeur accordée à un nouveau phénomène, et par suite à celui qui le découvre, varie selon que nous paraît grande ou petite la mesure dans laquelle le phénomène s'est écarté des résultats attendus, dans le cadre du paradigme. » (Kuhn, 1983, p. 87-88). Ce rôle en quasi-face de Janus du paradigme nous fait dire que celui-ci, au travers de la science normale qui en caractérise la stabilité et le succès, est à la fois son propre garde-fou et son seul fossoyeur. En effet, « en empêchant que le paradigme soit trop facilement renversé, la résistance garantit que les scientifiques ne seront pas dérangés sans raison et que les anomalies qui aboutissent au changement de paradigmes pénétreront intégralement les connaissances existantes. » (Kuhn, 1983, p. 99). Renchérissant son propos, Kuhn considérera le fait même qu'une nouveauté scientifique importante émerge si souvent simultanément de plusieurs laboratoires, comme une preuve d'une part de la nature fortement traditionnelle de la science normale et d'autre part du fait que cette entreprise traditionnelle prépare parfaitement la voie vers son propre changement. Lorsque cette période transitoire se distingue par la prolifération des théories, comme à l'époque où Lavoisier commençait ses expériences sur les « airs », on peut parler d'un signe symptomatique d'une crise. Cette dernière étant un luxe dont il faut user avec parcimonie, son avènement est synonyme d'obligation de



renouvellement des outils de la communauté scientifique, à l'instar de la manière dont l'industrie adopte de nouveaux instruments. Même si les scientifiques n'attestent pas forcément des renversements perceptifs qui accompagnent les changements de paradigme, une période, comme celle du choc des interprétations entre les tenants de la théorie d'une lumière onde et ceux pour qui c'était une particule, fut un moment de crise, une phase où « quelque chose n'allait pas ». Finalement, c'est la reconnaissance de la nature duale de la lumière qui mit fin à cette crise avec l'adoption de la théorie d'une lumière à la fois onde et corpuscule, lui accordant ainsi une nature différente et autonome. La crise met donc en évidence l'anomalie qui ouvre potentiellement l'ère postparadigmatique, car de l'avis de Kuhn « la perception de l'anomalie – c'est-à-dire d'un phénomène auquel le paradigme n'avait pas préparé l'expérimentateur – a joué un rôle essentiel pour préparer la voie à la perception de la nouveauté. » (Kuhn, 1983, p. 89). Au crédit de cette assertion, le philosophe des sciences évoque le récit de la découverte de l'oxygène. Avant d'expérimenter avec l'oxyde rouge de mercure, Lavoisier avait réalisé des expériences qui n'avaient pas donné les résultats prévisibles dans le cadre du paradigme du phlogistique ; tout comme la découverte de Roentgen eut pour origine l'émission d'une lueur tout à fait inattendue qui attira son attention. Ces découvertes se font par le truchement d'anomalies révélatrices de nouveaux phénomènes. Dans une mesure relative à la distance séparant les résultats considérés comme anormaux de ceux attendus ou prévus, les découvertes se caractérisent par « la conscience antérieure de l'anomalie, l'émergence graduelle de sa reconnaissance, sur le plan simultanément de l'observation et des concepts ; enfin, dans les domaines et les procédés paradigmatiques, un changement inévitable, souvent accompagné de résistance. » (Kuhn, 1983, p. 97). Autant dire que ces anomalies favorisent une sérendipité<sup>43</sup> (anglicisme rendu en français par « *fortuitude* » telle que l'a proposé

---

<sup>43</sup> Voir la chronique de Didier Pourquery, « Sérendipité », in *Le Monde* du 11 novembre 2012 ou encore sa première version sur le site du journal où l'auteur en rappelait la définition et l'étymologie en ces termes : « De quoi s'agit-il au départ ? D'un très vieux livre d'Amir Khosrow Dehlavi, poète persan du XIV<sup>e</sup> siècle (*Les Pérégrinations des trois fils de Serendip*), où trois princes du royaume de Serendip - le Ceylan d'alors - partent sur les routes et émerveillent leurs hôtes par leur capacité à dénicher des indices pour résoudre les énigmes les plus ardues. Le terme *serendipity* lui-même, dû

Henri Kaufman en 2011) génératrice de nouvelles théories. Certaines expériences, généreusement relatées par Kuhn dans son livre de 1962, tendent à accréditer l'idée que ces caractéristiques pourraient être inhérentes à la nature du processus perceptif lui-même. Il s'agit, notamment, des études effectuées par Bruner et Postman<sup>44</sup>. On peut comprendre alors l'enthousiasme du philosophe des paradigmes quand il conclut l'exposé de l'étude de ses collègues en soutenant que :

---

à l'écrivain anglais du XVIII<sup>e</sup> siècle Horace Walpole, désigne, à la suite du texte persan, ces découvertes faites par "*accident et sagacité*". Le mot est entré officiellement dans le langage scientifique au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Le sociologue Robert K. Merton écrit sur le fait "*d'observer une donnée inattendue, aberrante et capitale*" et d'en tirer une nouvelle théorie. Le concept est riche (notre cahier « Science & techno » y a consacré un dossier le 25 août). Il s'agit de hasard, bien sûr, mais aussi, comme l'a souligné Walpole dès l'origine, de sagacité, d'esprit de curiosité, d'agilité, de disponibilité mentale permettant de rester à l'affût du neuf et du surprenant. En feuilletant un journal imprimé (ou sur tablette), le seul fait de passer d'un sujet à l'autre peut être source d'enrichissement et de formation d'idées ou d'opinions nouvelles. » La sérendipité, pourrait donc être entendue, selon Pourquery, comme « ce qu'on trouve sans le chercher ». (L'intégralité de l'article est disponible sur [http://www.lemonde.fr/idees/article/2012/12/01/serendipite\\_1798814\\_3232.html](http://www.lemonde.fr/idees/article/2012/12/01/serendipite_1798814_3232.html), accédé le 20/06/2013.)

<sup>44</sup> L'expérience de Bruner et Postman relaté par Kuhn : « Au cours d'une expérience de psychologie qui mériterait d'être beaucoup plus connue du public, Bruner et Postman ont demandé à des sujets d'identifier une série de cartes à jouer, au cours de présentations brèves et contrôlées. Beaucoup de ces cartes étaient normales, certaines ne l'étaient pas, par exemple un six de pique rouge et un quatre de cœur noir. Chaque séquence expérimentale consistait à montrer une carte à un sujet unique, au cours de présentations de longueur croissante. Après chaque présentation, on demandait au sujet ce qu'il avait vu et la séquence se terminait quand deux identifications successives avaient été correctes. Les premières présentations très courtes suffirent à de nombreux sujets pour identifier la plupart des cartes, et après une légère augmentation du temps d'exposition, tous les sujets les identifièrent toutes. Pour les cartes normales, ces identifications étaient habituellement correctes, mais les cartes anormales étaient presque toujours identifiées comme normales, sans hésitation ou surprise apparentes. Le quatre de cœur noir, par exemple, était pris pour le quatre de pique ou de cœur, sans aucune prise de conscience de l'anomalie ; il était immédiatement intégré à l'une des catégories conceptuelles fournies par l'expérience antérieure. On ne peut même pas dire que les sujets avaient vu quelque chose de différent de ce qu'ils avaient identifié. Si l'on augmentait le temps de présentation des cartes anormales, ils commençaient à hésiter et à montrer qu'ils prenaient conscience de l'anomalie. En face du six de pique rouge, certains disaient par exemple : c'est le six de pique, mais il y a quelque chose qui ne va pas – le noir a une bordure rouge. En augmentant encore le temps d'exposition, leur hésitation et leur confusion ne faisaient que croître jusqu'à ce que finalement, et parfois très soudainement, la plupart des sujets donnent l'identification correcte sans hésitation. Qui plus est, l'expérience répétée avec deux ou trois des cartes anormales, ils avaient ensuite peu de difficultés avec les autres. Quelques sujets pourtant ne furent jamais capables de réajuster leurs catégories de manière satisfaisante. Même avec un temps d'exposition quarante fois supérieur au temps moyen nécessaire pour reconnaître les cartes normales, plus de 10% des cartes anormales n'étaient pas correctement identifiées. Et les sujets ressentaient souvent lors de cet échec une détresse personnelle intense. L'un d'eux s'exclama : « Je ne peux reconnaître le genre de carte, quel qu'il soit. Cela ne ressemblait même pas à une carte cette fois-ci. Je ne sais pas de quelle couleur elle est maintenant et si c'est un pique ou un cœur. Je ne sais même plus à quoi ressemble un pique. Mon Dieu ! » Au cours du prochain chapitre, nous verrons parfois des scientifiques se conduire de cette manière. » (Kuhn, 1983, p. 97).

Cette expérience psychologique (pour sa valeur de métaphore ou bien dans la mesure où elle reflète la nature de l'esprit) fournit un schéma merveilleusement simple et convaincant du processus de découverte scientifique. Comme dans cette expérience sur les cartes à jouer, la nouveauté scientifique n'apparaît qu'avec difficulté (ce qui se manifeste par une résistance) sur un fond constitué par les résultats attendus. (Kuhn, 1983, p. 98).

Cependant, l'anomalie ne conduit pas automatiquement à l'abandon du paradigme puisque même dans le doute légitime infligé par la découverte de nouveaux phénomènes, les scientifiques ne renoncent pas facilement au paradigme qui les aura menés à la crise. Pour Kuhn, un tel entêtement s'explique par le fait « qu'ils ne considèrent pas ces anomalies comme des preuves contraires, bien que ce soit là leur véritable nature en termes de philosophie des sciences. » (Kuhn, 1983, p. 114). C'est pourquoi il faut plus qu'une simple anomalie pour provoquer une crise.

Ainsi, le problème de la résistance de l'éther, tel qu'entendu par les tenants de la théorie de Maxwell, bouleversait les généralisations explicites et fondamentales de ce paradigme. Si l'on remonte plus loin, le cas de la révolution copernicienne est assez éloquent en ce que la question pratique de la mise au point du calendrier, qui semblait être une anomalie en apparence sans importance fondamentale, finira par avoir raison de plus de deux mille ans de certitude scientifique. Kuhn concède donc que le développement de la science normale peut transformer une anomalie agaçante en une source de crise dangereuse pour la survie d'un paradigme, comme en témoigne l'importance prise par le problème des rapports de poids après l'évolution des techniques de la chimie des gaz. Il n'est pas exclu, en revanche, que d'autres circonstances puissent donner à une anomalie une valeur particulière ou que plusieurs d'entre elles se combinent. Il faut donc plus qu'une anomalie pour provoquer une crise, mais dans des circonstances similaires à celle qui précède, bien souvent, la « science extraordinaire » prend le pas sur la « science normale ». Ainsi, quand les raisons ci-dessus ou d'autres du même ordre permettent de déceler dans une anomalie quelque chose qui dépasse une énigme de la science normale, alors on pourra dire que la transition vers la crise et le passage à la science extraordinaire



auront commencé. Une telle dynamique, si l'on en croit Kuhn, a pour fonction de familiariser les groupes de spécialistes à l'anomalie tout en attirant l'attention de ses plus éminents membres. En cas de résistance de l'anomalie, sa résolution pourrait devenir une priorité absolue pour certains membres du groupe au point de constituer le sujet par excellence de leur discipline, ce qui lui confère un nouvel aspect.

Ce nouvel aspect résulte en partie sans doute du nouveau point de focalisation de la recherche scientifique ; mais plus encore de la nature divergente des nombreuses solutions partielles qui se proposent, étant donné l'attention générale concentrée sur cette difficulté anormale. Les premiers assauts livrés contre ce point de résistance auront probablement suivi d'assez près les règles du paradigme. Mais, la résistance se poursuivant, un nombre de plus en plus grand d'assauts auront comporté quelque ajustement, de portée plus ou moins limitée, au paradigme : ajustements tous différents, chacun ayant un succès partiel, mais aucun ne parvenant à se faire adopter comme paradigme par le groupe. En raison de cette prolifération d'adaptations divergentes (qui seront de plus en plus souvent présentées comme des ajustements ad hoc), les règles de la science normale perdent progressivement de leur précision. Le paradigme existe encore, mais peu de spécialistes se révèlent entièrement d'accord sur sa nature. Même les solutions antérieurement acceptées comme valables pour des problèmes résolus sont mises en question. (Kuhn, 1983, p. 121-122).

L'une des fonctions de la crise est, d'une certaine façon, de briser les tabous et de diminuer l'emprise des stéréotypes en fournissant de nouveaux éléments susceptibles de mener à un changement fondamental de paradigme. Il arrive que la forme du nouveau paradigme soit annoncée par la structure donnée à l'anomalie pendant la recherche extraordinaire. Kuhn soutient qu'à l'exception d'Einstein qui « écrivait qu'avant d'avoir aucune théorie à substituer à la mécanique classique, il avait saisi l'interrelation existant entre les anomalies connues de la radiation du corps noir, l'effet photoélectrique et les chaleurs spécifiques. » (Kuhn, 1983, p. 30). Il est plus fréquent qu'une structure de ce genre ne soit pas vue d'avance puisque « le nouveau paradigme apparaît tout à coup, parfois au milieu de la nuit, dans l'esprit d'un homme profondément plongé dans la crise. » (Kuhn, 1983, p. 130). Nous nous garderons bien de rouvrir les multiples débats que cette position de Kuhn a provoqués au sein de la communauté des philosophes des sciences. Celle-ci, rapporte-t-il dans sa longue postface à la *Structure des révolutions scientifiques*, lui a valu d'être traité, entre autres, de relativiste, voire d'irrationaliste.



Tout compte fait, l'adoption ou le rejet d'un nouveau paradigme n'est qu'une réponse à la crise. Fort de ce constat tiré de son analyse minutieuse de l'histoire des sciences, Kuhn rue dans les brancards du falsificationnisme de Popper. En effet, pour lui, l'étude historique du développement scientifique ne révèle aucun processus ressemblant à la démarche méthodologique qui consiste à « falsifier » une théorie au moyen d'une comparaison directe avec la nature. Mais, prévient-il, cela ne veut pas dire que les scientifiques ne rejettent pas les théories scientifiques, ou que l'expérience et l'expérimentation ne soient pas essentielles dans le processus qui les y invite. Laudan, quant à lui, soutient que sur cette question du choix de la théorie la plus apte, les inductivistes recommanderaient de choisir la théorie qui a le degré de confirmation le plus élevé ou celle qui a la plus grande utilité, les falsificationnistes, choisiraient la théorie qui a le plus haut degré de falsifiabilité alors que Kuhn arguerait de l'impossibilité d'effectuer le moindre choix rationnel (Laudan, 1977, p. 119-120). Cet extrait de la *Structure des révolutions scientifiques* semble étayer les propos du philosophe et historien des sciences du *Massachusetts Institute of Technology* :

Décider de rejeter un paradigme est toujours simultanément décider d'en accepter un autre, et le jugement qui aboutit à cette décision implique une comparaison des deux paradigmes par rapport à la nature et aussi de l'un par rapport à l'autre. Une seconde raison incite à douter que les scientifiques rejettent un paradigme simplement parce qu'ils se trouvent en face d'anomalies ou de preuves contraires. Et en le développant, l'une des thèses essentielles de cet essai apparaîtra d'elle-même. Les motifs de doute scientifique indiqués plus haut étaient purement relatifs à des faits ; il s'agissait de preuves infirmant une théorie épistémologique généralement admise. En tant que telles, si mon raisonnement est correct, elles peuvent tout au plus contribuer à créer une crise ou, plus exactement, augmenter l'intensité d'une crise déjà existante. En soi, elles ne prouveront pas, elles ne pourront pas prouver la fausseté de cette théorie philosophique, car ses adeptes feront ce que nous avons vu faire aux savants face à une anomalie : ils élaboreront de nouvelles versions et des remaniements ad hoc de leur théorie afin d'éliminer tout conflit apparent. Si donc ces preuves épistémologiques contraires doivent en arriver à être plus qu'une source mineure d'agacement, ce sera parce qu'elles contribuent à permettre l'apparition d'une analyse scientifique nouvelle et différente, au sein de laquelle elles ne seront plus une cause de difficulté. D'ailleurs, s'il est possible d'appliquer ici un schéma typique que nous observerons plus tard dans les révolutions scientifiques, ces anomalies n'apparaîtront plus alors comme de simples faits. Sous l'angle d'une nouvelle théorie de la connaissance scientifique, il y a de fortes chances pour qu'elles apparaissent comme des tautologies, expressions de situations que l'on n'aurait pu concevoir différentes. (Kuhn, 1983, p. 115-116).

Considérant que la nouveauté scientifique n'apparaît qu'avec difficulté sur un fond constitué par les résultats attendus, Kuhn note qu'au début de l'apparition de l'anomalie, on ne perçoit que des résultats attendus et habituels, même si les conditions de l'observation sont celles mêmes où l'on remarquera plus tard une anomalie. C'est une meilleure connaissance du sujet qui permettra de réaliser que quelque chose ne va pas, ou de rattacher l'effet détecté à quelque chose qui déjà n'allait pas auparavant. Aussi estimera-t-il que c'est cette prise de conscience de l'anomalie qui ouvrira une période durant laquelle les catégories conceptuelles sont réajustées jusqu'à ce que ce qui était à l'origine anormal devienne le résultat attendu. Pour le philosophe du *MIT*, à ce moment précis, l'on peut dire que la découverte est achevée (Kuhn, 1983, p. 98). Ainsi s'ouvre un nouveau champ de recherche ou, dans le langage kuhnien, un nouveau paradigme. Ceci correspond précisément à la « révolution scientifique » puisque selon cet extrait de la page 131 de l'édition française de *La structure des révolutions scientifiques* de 1983, « le passage au nouveau paradigme est une révolution scientifique (...). »

On peut dire dans l'optique de l'auteur de la théorie des paradigmes que toutes les crises commencent par l'obscurcissement du paradigme en vigueur et par un relâchement consécutif des règles de sa recherche normale tel que la recherche durant la crise ressemble beaucoup à celle de la période antérieure au paradigme, à ceci près que le foyer de divergence est à la fois plus petit et plus clairement défini. Par contre, toutes se terminent de l'une des trois façons suivantes : 1°) soit lorsque la science normale se révèle enfin capable de résoudre le problème à l'origine de la crise ou que le problème résiste, malgré la décision de l'attaquer sous un angle en apparence radicalement nouveau ; 2°) soit les scientifiques se résignent à l'impossibilité d'une solution convenable compte tenu de l'état du moment de leur domaine de recherche, ce qui leur ferait reporter la résolution du problème aux générations futures, disposant d'outils plus développés ; 3°) soit, la crise se termine avec l'apparition d'un nouveau candidat au titre de paradigme et une bataille s'ensuit pour son adoption (Kuhn, 1983, p. 123-124).

### 3.1.3. Conclusion

Au terme de cette première étape de notre troisième chapitre, nous avons vu la structure de la théorie épistémologique de Thomas Kuhn qui considère que d'un paradigme à l'autre il y a une série d'énigmes plus ou moins faciles à résoudre dans le cadre d'une science normale féconde et prospère, mais encadrée par un paradigme dominant. Seulement, il arrive qu'une énigme résiste à l'ordre établi par le paradigme et amène la communauté scientifique à s'interroger non plus sur l'énigme, mais sur le paradigme lui-même. Ainsi entre-t-on en « anomalie » scientifique. Celle-ci serait le seuil de la mise en crise du paradigme. En effet, si une solution est trouvée dans le cadre de celui-ci, le paradigme est sauf ; autrement on nage en pleine « science extraordinaire ». De l'issue des multiples tentatives engagées avec plus de marge de manœuvre pour les chercheurs dans le cadre de ces recherches extraordinaires dépend le sort du paradigme. Ainsi, la résolution de l'énigme hors du cadre du paradigme qui aura servi à la produire consacrerait la révolution scientifique. Sachant qu'abandonner un paradigme, c'est toujours décider d'en adopter un autre, la recherche reprend dans un nouveau cadre de rationalité en totale rupture avec celui qui l'a précédée au point que Kuhn parle d'incommensurabilité entre les paradigmes. Mais qu'en est-il de la place de la technologie dans le fonctionnement paradigmatique ?

Bien que reconnaissant, dès la préface de *La structure des révolutions scientifiques*, l'importance et le rôle du progrès technique<sup>45</sup>, qu'il s'excuse presque de devoir négliger du fait de son léger impact sur sa théorie, Kuhn n'évoque le terme

---

<sup>45</sup> « La simple existence d'un paradigme n'est pas un critère suffisant pour que l'on trouve la transition évolutive étudiée au chapitre premier. Et, ce qui est plus grave, je n'ai rien dit du rôle du progrès technique et des conditions extérieures du développement des sciences. Il suffit cependant de penser à Copernic et au calendrier pour voir que les conditions extérieures peuvent aider à faire d'une simple anomalie une cause de crise aiguë. Le même exemple illustrerait de quelle façon les conditions extérieures à la science peuvent influencer sur l'éventail des possibilités offertes à celui qui cherche à mettre fin à une crise en proposant telle ou telle réforme révolutionnaire. Une prise en considération explicite d'influences extérieures de ce genre ne modifierait pas, me semble-t-il, les thèses principales développées dans cet essai, mais elle lui ajouterait une dimension analytique de première importance pour la compréhension du progrès scientifique. » (Kuhn, 1983, Préface, p. 13).

« technologie » que cinq fois<sup>46</sup> dans la version française de son ouvrage, si l'on exclut la note de bas de page n° 3 de la page 50 qui fait référence au titre anglais de l'ouvrage d'Abraham Wolf<sup>47</sup> qui comporte le mot « *technology* » plutôt que « technologie ». Et, la première fois qu'il fait usage de ce lexème, ce n'est qu'à la page 36 de son livre et c'était pour lui reconnaître un rôle de premier plan dans l'émergence de nouvelles sciences<sup>48</sup>. Le mot « science », en revanche, est mentionné autant de fois, rien que dans la première page de la préface. Au vu de cette éloquente disproportion, on pourrait bien penser pouvoir déduire la place qu'occupe la technologie dans la théorie de Kuhn étant donné la parcimonie avec laquelle il a eu recours à cette terminologie. Mais, gardons-nous bien d'aller trop vite en besogne puisque l'examen plus détaillé de cette question sera l'objet de notre prochain sous-chapitre.

### 3.2. Kuhn à l'épreuve de la technoscience

Répondant à une question rhétorique sur la place de la technique dans la philosophie de Kuhn, Gilbert Hottois affirmait qu'« elle est à la fois reconnue et *externalisée*. » (Hottois, 2004a, p. 54). Ce terme, souligné par Hottois lui-même, tente de rendre compte de la situation de la technique relativement à l'entreprise de savoir telle que conçue par les philosophes des sciences. Pour le philosophe belge, « externaliser, c'est confier une entreprise indispensable à une entreprise extérieure, sous-traiter. » (Hottois, 2004a, p. 54). Si nous remontons à ce que nous avons vu au chapitre 2, prétendre comprendre les nanotechnosciences, c'est octroyer plus qu'une place de

<sup>46</sup> Ce mot, d'après le nombre d'occurrences que nous avons pu déceler, apparaît aux pages 36, 41, 50, 221 (deux fois) et 229.

<sup>47</sup> Kuhn fait référence au titre de l'ouvrage d'Abraham Wolf auquel il renvoyait dans la 3<sup>e</sup> note de bas de page : « Au sujet des deux télescopes de la parallaxe, voir Abraham Wolf, *A history of science, technology and philosophy in the Eighteenth Century* (2<sup>e</sup> éd.; Londres, 1952), pp. 103.105 » (Kuhn, 1983, p. 50).

<sup>48</sup> « L'artisanat constituant une source facilement accessible de faits qui n'auraient pas pu être découverts accidentellement, la technologie a souvent joué un rôle vital dans l'émergence de nouvelles sciences. » (Kuhn, 1983, p. 36).



simple figurant à la technologie dans ses inéluctables interactions avec la science. Tout comme la technoscience octroie à la technologie plus qu'une simple place de figurant dans le processus de construction et de développement de l'activité scientifique. Dans cette partie de notre analyse, c'est justement l'importance donnée à la technologie dans la construction du système de Kuhn qui va nous intéresser. Cet examen accompli, nous essaierons de chercher d'autres raisons de croire que la philosophie de Kuhn pourrait aussi être une philosophie de la technoscience, voire de la nanotechnoscience. Ce sera seulement à l'issue des résultats révélés par cette présente confrontation en deux étapes que nous verrons comment la philosophie du théoricien des paradigmes a pu manquer le rendez-vous avec l'avènement des nanotechnosciences.

Comme nous l'avons vu vers la fin du sous-chapitre précédent, la technologie occupe une place congrue dans l'univers lexical de *La structure des révolutions scientifiques*. Mais, cela signifie-t-il pour autant que Kuhn n'accorde pas à la technologie la place qu'elle mérite ? C'est ce que nous allons tenter d'élucider ci-après. À la fin de notre précédente présentation, nous évoquions le nombre de fois où Kuhn a eu recours au terme « technologie ». Pourtant, cette sous-représentation terminologique ne traduit ni son absence dans les pratiques courantes paradigmatiques, ni son insignifiance. En risquant une paraphrase de Blaise Pascal, nous pouvons dire qu'en fait, les technologies ne sont quasiment nulle part dans le paradigme, mais les outils, les instruments et les appareils y sont partout. Dans les différents usages du morphème « technologie », Kuhn fait allusion successivement à sa qualité de catalyseur de nouvelles sciences<sup>49</sup>, puis à sa nature différente de la

---

<sup>49</sup> « L'artisanat constituant une source facilement accessible de faits qui n'auraient pas pu être découverts accidentellement, la technologie a souvent joué un rôle vital dans l'émergence de nouvelles sciences. » (Kuhn, 1983, p. 36).

science<sup>50</sup>, ensuite il évoque sa synonymie d'antan avec l'art et l'artisanat<sup>51</sup> suivi de la reconnaissance du lien intrinsèque entre le triptyque science, technologie et progrès, avant de finir par en reconnaître l'existence dans toutes les civilisations du monde<sup>52</sup> en tout temps, contrairement à la science. Cependant, quand nous recourons à un autre indicateur, tels que l'usage du mot « instrument » ou celui d'« appareil » pour mieux envisager le statut de la technologie dans la théorie des révolutions scientifiques, nous obtenons de meilleurs résultats. Si l'on parcourt attentivement le texte de Kuhn, il est effectivement possible d'y déceler au moins trente-huit occurrences du mot « instrument » et ses dérivées dont six dans la postface, quarante-deux usages du mot appareil et appareillage, ainsi que vingt recours au terme « outil » et un à « outillage », alors que le lexème « science » y apparaît pas moins de six cents fois. Au vu de ces indicateurs, il semble que l'objet principal de Kuhn soit, sans conteste, la science et que tout ce qui touche à la technologie ne soit qu'accessoire dans son discours. Cependant, à l'examen plus approfondi de son texte, nous nous apercevrons de la difficulté d'assigner une place prépondérante à l'attirail technologique dans la théorie des paradigmes.

### 3.2.1. Les dispositifs technologiques dans la théorie de Kuhn

Dès le premier usage du mot « technologie », Kuhn lui reconnaît « un rôle souvent vital dans l'émergence de nouvelles sciences. » (Kuhn, 1983, p. 36). Puis, il le range dans la même catégorie que la médecine et le droit dont il dit que « la principale raison d'être est un besoin social extérieur » (Kuhn, 1983, p. 41). Ce n'est ensuite

---

<sup>50</sup> « Dans les sciences (à la différence des disciplines comme la médecine, la technologie, le droit, dont la principale raison d'être est un besoin social extérieur), la création de journaux spécialisés, la fondation de sociétés de spécialistes et la revendication d'une place spéciale dans l'ensemble des études sont généralement liées au moment où un groupe trouve pour la première fois un paradigme unique. » (Kuhn, 1983, p. 41, c'est nous qui soulignons).

<sup>51</sup> D'ailleurs, même après l'interruption de ces échanges réguliers, le terme « art » a continué à s'appliquer à la technologie et à l'artisanat (que l'on considérait aussi comme progressifs) autant qu'à la peinture et à la sculpture. » (Kuhn, 1983, p. 221).

<sup>52</sup> « Toutes les civilisations que nous connaissons par la reconstruction historique ont possédé une technologie, un art, une religion, un système politique, des lois, etc., bien souvent aussi développés que les nôtres. Mais seules les civilisations qui sont filles de la Grèce hellénique ont possédé autre chose qu'une science extrêmement rudimentaire. » (Kuhn, 1983, p. 229, c'est nous qui soulignons).

qu'à la page 221 de l'ouvrage qu'il recourt à ce terme pour rappeler sa synonymie d'antan avec l'art et l'artisanat et leur proximité, voire leur unité d'avec les sciences. En effet, durant la Renaissance, ainsi que l'affirme Kuhn, « on n'avait pas le sentiment d'une grande division entre les sciences et les arts. » Selon lui, « si de nos jours encore, nous éprouvons bien des difficultés à voir la profonde différence qui sépare la science et la technologie, sans doute est-ce en partie du fait que le progrès est un attribut évident de ces deux secteurs. » (Kuhn, 1983, p. 221). Enfin, la dernière référence au morphème « technologie » dans *La structure des révolutions scientifiques* semble consacrer une spécificité sans conteste de la civilisation occidentale grâce au développement qu'a connu la science en Europe au cours des quatre, voire cinq, derniers siècles. Ainsi, chez Kuhn comme chez beaucoup de philosophes des sciences occidentaux, le signe distinctif de l'Occident, voire son critère de démarcation incontestable, est que « seules les civilisations qui sont filles de la Grèce hellénique ont possédé autre chose qu'une science extrêmement rudimentaire. » (Kuhn, 1983, p. 229). Notre but ici n'étant pas de discuter ces propos de Kuhn, nous noterons simplement que pour Kuhn, mise à part la science, toutes les civilisations connues au monde « ont possédé, selon sa propre expression, une technologie, un art, une religion, un système politique, des lois, etc., bien souvent aussi développés que les nôtres. » (Kuhn, 1983, p. 229). Quel rôle fait-il alors jouer aux dispositifs technologiques totalement distingués de la science dans sa théorie épistémologique ?

#### 3.2.1.1. Les appareils comme les théories ne sont pas découverts par hasard

Selon Kuhn, les liens très étroits qui unissent théorie et technologie sont constants. Il reconnaît même que la théorie-paradigme est souvent directement impliquée dans la conception de l'appareillage susceptible de résoudre les problèmes posés au sein du cadre de recherche. Afin d'illustrer son propos, il soutient que « sans les

*Principia*, par exemple, les mesures faites à l'aide de la machine d'Atwood<sup>53</sup> n'auraient eu aucun sens. » (Kuhn, 1983, p. 50). L'historien des sciences du *Massachusetts Institute of Technology* reconnaît que les instruments sont parties intégrantes du paradigme qui peut tenir les groupes de chercheurs à l'écart de problèmes d'importance sociale certes, mais non réductibles aux données d'une énigme du fait de l'incompatibilité de ces problèmes avec les outils conceptuels et instrumentaux fournis par le paradigme (Kuhn, 1983, p. 63). Ainsi, non seulement le paradigme ne se laisse pas déterminer par l'influence sociale, mais il fournit aux chercheurs des outils conceptuels et instrumentaux.

Pour Kuhn, à l'instar de la bouteille de Leyde, ni les théories ni les appareillages ne peuvent être découverts accidentellement ou par hasard. En effet, dit-il :

Ces électriciens qui, pensant que l'électricité est un fluide, ont accordé une importance particulière à la conduction et fourni un excellent exemple. En l'occurrence, guidés par cette idée qui ne pouvait guère convenir à la multiplicité connue des effets d'attraction et de répulsion, plusieurs d'entre eux conçurent le projet de mettre en bouteille le fluide électrique. Le résultat immédiat de leurs efforts fut la bouteille de Leyde, appareillage que n'aurait jamais pu découvrir un homme explorant accidentellement ou au hasard, mais qui fut en fait réalisé indépendamment par deux chercheurs au moins, dans les années 1740. Presque dès le début de ses recherches, Franklin se préoccupa d'expliquer cet appareil étrange et, en l'occurrence, particulièrement révélateur. Le fait qu'il ait réussi fut le plus efficace des arguments qui firent de sa théorie un paradigme, bien qu'incapable encore de rendre compte de tous les cas connus de répulsion électrique. (Kuhn, 1983, p. 38).

De manière analogue, un appareillage fut nécessaire à la détermination de la constante de la gravitation universelle tel que prédit par les travaux de Newton. Ainsi, Kuhn affirme qu'au cours du siècle qui a suivi la parution des *Principia* personne ne réussit à mettre au point un tel dispositif. Ce ne fut que vers 1790 que la détermination de Cavendish, qui avait pour but initial l'estimation de la masse de la Terre directement liée à la constante gravitationnelle dans l'équation de Newton, permit de déterminer celle-ci grâce à une balance de torsion. Cette expérience fut

---

<sup>53</sup> Atwood (1746-1807), surtout célèbre chez les élèves de terminale des années 1945 à 1972, est l'auteur de la machine qui porte son nom et qui servait à familiariser les jeunes étudiants avec la seconde loi de Newton (relation fondamentale de la dynamique) et la question de la conservation de l'énergie mécanique.



suivie par d'autres propositions (Kuhn, 1983, p. 51). Kuhn souligne ici le caractère indispensable d'une sorte d'idée directrice qui exclurait du processus de mise au point des dispositifs technologiques le hasard et l'accident. Mais, quel rôle consent-il à faire jouer à ces appareils ?

### 3.2.1.2. Nécessité de l'appareillage pour la réussite scientifique

Kuhn reconnaît sans ambages le caractère incontournable de l'appareillage dans la résolution d'énigmes, la provocation de la crise et la neutralisation ou le report de la crise en cas de persistance de l'anomalie. Dans cette optique, il n'hésite pas à attribuer la réussite de Coulomb à la qualité de l'appareil qu'il a construit. Aussi, contrairement aux expériences de Boyle qui n'étaient pas concevables tant que l'air n'avait pas été considéré comme un fluide élastique auquel auraient pu s'appliquer toutes les conceptions élaborées de l'hydrostatique, « Coulomb a réussi parce qu'il a construit un appareillage capable de mesurer la force existant entre des charges ponctuelles (ceux qui avaient auparavant mesuré des forces électriques en utilisant des balances à plateaux ordinaires n'avaient jamais trouvé de résultats constants ni reproductibles), mais cet appareillage à son tour dépendait du fait qu'on avait préalablement constaté que chaque particule du fluide électrique agit à distance sur chacune des autres particules. » (Kuhn, 1983, p. 52). Cette réalisation de Coulomb lui permettait ainsi de déterminer la force à l'œuvre entre ces particules et qui n'était qu'une fonction de la distance. D'un autre côté, le défaut d'appareillage adapté peut pousser la communauté scientifique à reporter la résolution d'une énigme. C'est bien ce qui s'entend dans ces propos de Kuhn :

Quelquefois, la science normale se révèle *in extremis* capable de résoudre le problème à l'origine de la crise, malgré le peu d'espoir conservé par ceux qui voyaient là la fin du paradigme existant. Dans d'autres cas, le problème résiste, même si on l'aborde d'un point de vue en apparence radicalement nouveau. Les scientifiques peuvent alors conclure qu'aucune solution ne se présentera dans l'état actuel de leur domaine de recherche. Le problème est étiqueté et mis de côté pour une génération future, disposant d'outils plus développés. Ou bien, finalement, et c'est le cas qui nous concerne le plus directement ici, une crise peut se terminer avec l'apparition d'un nouveau candidat au titre de paradigme et une bataille s'ensuit pour son adoption. (Kuhn, 1983, p. 123-124).

De ce qui précède, il suit que le bon appareillage fait partie intégrante des conditions de la réussite scientifique, que ce soit en tant qu'instrument d'observation, de mesure, d'expérimentation ou de calcul. Toutefois, d'autres fonctions sont attribuées aux systèmes technologiques dans la doctrine kuhnienne.

### 3.2.1.3. L'appareillage comme révélateur d'anomalies et de crise

En vérité, les dispositifs technologiques ne sont pas seulement des catalyseurs de l'orientation paradigmatique, ils peuvent aussi en être les fossoyeurs. En effet, de l'aveu même de Kuhn, tantôt un problème normal qui se résolvait au moyen de règles et de procédés connus résiste au groupe de chercheurs dont c'est la spécialité, tantôt un appareillage conçu pour la recherche normale peut ne pas fournir les résultats attendus et révéler une anomalie irréductible aux attentes des spécialistes (Kuhn, 1983, p. 23). Dans le cas de la découverte des rayons *X*, l'appareillage de Roentgen révéla une anomalie historique qui aboutit au nouveau tournant qui en découla. Kuhn relate le début de l'histoire de cette découverte qui se confond avec le jour où le physicien vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle mis fin à une recherche normale sur les rayons cathodiques après avoir remarqué qu'un écran de platinocyanure de baryum, placé à quelque distance de son appareillage blindé, émettait une lueur au moment de la décharge. Sept longues semaines de fiévreuses nouvelles recherches lui indiquèrent que la lueur provenait du tube de rayons cathodiques, que la radiation projetait des ombres et qu'elle ne pouvait pas être détournée par un aimant. Roentgen annonça sa découverte après avoir eu la conviction que l'effet observé n'était pas dû aux rayons cathodiques, mais plutôt à un agent présentant une certaine similitude avec la lumière (Kuhn, 1983, p. 89). Du coup, sans un appareillage spécial construit surtout en vue de résultats anticipés, ceux qui aboutissent finalement à la découverte d'une nouveauté ne pourraient pas se manifester. En revanche, cette manifestation nécessite toujours l'intervention d'un spécialiste capable de reconnaître que ce qui se produit ne correspond en rien à ce que l'on était en droit d'attendre en vertu des principes propres au paradigme qui pourrait

contribuer à sa propre falsification, c'est-à-dire à son changement (Kuhn, 1983, p. 99).

En définitive, pour Kuhn, à l'exception de ceux qui sont exclusivement instrumentaux, tout problème où la science normale voit une énigme peut être considéré, d'un autre point de vue, comme un contre-exemple, et devenir ainsi une source de crise. En effet, les énigmes de la science normale n'existent que parce qu'aucun paradigme accepté comme base de la recherche scientifique ne résout jamais complètement tous ses problèmes. Les très rares paradigmes qui ont semblé y parvenir, à l'instar de l'optique géométrique, ont très vite cessé de proposer un problème quelconque de recherche et sont devenus des outils techniques. C'est pourquoi, « à l'exception de ceux qui sont exclusivement instrumentaux, tout problème où la science normale voit une énigme peut être considéré, d'un autre point de vue, comme un contre-exemple, et devenir ainsi une source de crise. » (Kuhn, 1983, p. 117). Copernic, Lavoisier et Einstein illustrent parfaitement ce point puisque là où le premier voyait des contre-exemples, ses prédécesseurs, les ptoléméens voyaient des énigmes ; quand le second voyait un autre contre-exemple, son collègue Priestley considérait une énigme convenablement résolue dans le cadre de la théorie du phlogistique ; et lorsque le dernier des trois détectait des contre-exemples, Lorentz Fitzgerald et d'autres se contentaient de considérer des énigmes, notamment dans la question relative à la mise au point des lois de Newton et de Maxwell. Ce qui fit dire à Kuhn que même l'existence d'une crise ne transforme pas automatiquement une énigme en contre-exemple (Kuhn, 1983, p. 117).

Pour ce dernier, le savant doit démontrer, par l'analyse de son appareillage en termes compatibles avec les fondements établis de la théorie optique, que les nombres donnés par son instrument sont ceux que la théorie admet comme longueurs d'onde. Il doit réorganiser l'appareillage pour que les résultats expérimentaux puissent sans équivoque être mis en corrélation avec la théorie. C'est la raison pour laquelle :

Le savant qui construit un dispositif pour déterminer des longueurs d'onde optiques ne doit pas se contenter d'un appareil capable simplement d'attribuer des nombres particuliers à des spectres particuliers. Il n'est pas là seulement pour explorer ou mesurer. Il lui faut démontrer, par l'analyse de son appareillage, en termes compatibles avec les fondements établis de la théorie optique, que les nombres donnés par son instrument sont ceux que la théorie admet comme longueur d'onde. Si un certain manque de précision dans la théorie, ou certains éléments non analysés dans son appareillage l'empêchaient de terminer sa démonstration, ses collègues pourraient très bien conclure qu'il n'a rien mesuré du tout. (Kuhn, 1983, p. 65).

Par exemple, le cas des *maxima* de dispersion de l'électron dans lesquels on s'attendait à voir des indices de la longueur d'onde de l'électron n'a pas eu de signification évidente lors des premières observations. Mais, dès qu'ils ont été rattachés à une théorie prédisant que la matière en mouvement présenterait certains caractères des ondes, tout devint clair. Ce lien établi, il a fallu réorganiser l'appareillage pour que les résultats expérimentaux puissent sans équivoque être mis en corrélation avec la théorie (Kuhn, 1983, p. 65). Dans un autre registre, le théoricien des révolutions scientifiques évoque l'échec des scientifiques qui essayèrent tout au long du XVIII<sup>e</sup> siècle de déduire le mouvement observé de la Lune des lois newtoniennes du mouvement et de la gravitation. Cette situation eut pour conséquence de pousser certains d'entre eux à envisager le remplacement de la loi du carré inverse par une loi qui s'en écarterait pour de petites distances. Mais, cela aurait débouché sur la définition d'une nouvelle énigme et non à la résolution de l'ancienne. « En l'occurrence, les savants s'en tinrent à leurs règles jusqu'à ce que, en 1750, l'un d'entre eux découvrit la façon de les appliquer avec succès. » (Kuhn, 1983, p. 66). Ce fut donc un changement des règles du jeu qui a pu fournir une nouvelle perspective plus viable.

À la lumière de ce que nous venons de voir, l'on pourrait être tenté d'adhérer à la thèse de Kuhn selon laquelle la décision d'employer un appareillage particulier, d'une manière particulière, sous-entend qu'un certain genre de circonstances seulement se présentera sur le plan instrumental comme sur le plan théorique. Le fait de s'attendre à certains résultats plutôt qu'à d'autres joue un rôle décisif dans le développement scientifique tel qu'en atteste l'histoire de la découverte tardive de l'oxygène (Kuhn, 1983, p. 92). Mais quel type de relations entre technologie et



théorie permet de les envisager comme déterminants pour l'accroissement et l'efficacité de la science ?

### 3.2.2. Relations entre technologie et théorie

La technologie occupe une place capitale dans l'accroissement de l'efficacité et du rendement de la recherche. L'histoire de l'électricité (voir à ce sujet Borvon, 2009) au XVIII<sup>e</sup> siècle fournit une panoplie particulièrement riche d'appareils spéciaux allant de la bouteille de Leyde, réputée ancêtre du condensateur conçu en 1745 (certaines sources retiennent 1746) par Pieter van Musschenbroek dans la ville des Pays-Bas qui lui prête son nom, au condensateur plan *Æpinus*, du nom du philosophe allemand Franz Ulrich Theodor *Æpinus* qui le fabriqua en 1756 sur le même principe, mais avec l'air plutôt que le verre comme isolant. De l'avis de Kuhn, le groupe uni des électriciens put poursuivre l'étude beaucoup plus détaillée de phénomènes bien choisis et pour l'étude systématique et obstinée desquels ces appareils ont été créés. C'est ainsi que les efforts consentis par cette communauté pour accumuler des faits et ajuster la théorie commencèrent à leur faire gagner en précision. En conséquence, « l'efficacité et le rendement de la recherche électrique augmentèrent en conséquence, comme pour prouver une version sociale de la profonde maxime méthodologique de Francis Bacon : "La vérité émerge plus facilement de l'erreur que de la confusion." » (Kuhn, 1983, p. 39-40). Ce modèle de réussite explique pourquoi les efforts consentis pour atteindre une connaissance plus exacte et plus large des faits occupent une place de choix dans les récits d'expériences ou d'observations scientifiques aboutissant souvent à la conception d'appareillages spéciaux et complexes fruits d'un travail coûteux, talentueux et fastidieux. Les synchrotrons et les radiotélescopes en furent des illustrations fort à propos en 1962. Mais, ces chefs-d'œuvre de technologie ne voient le jour que si un paradigme assure préalablement les chercheurs de l'importance de leur enquête (Kuhn, 1983, p. 48). Le caractère indispensable, voire la nécessité de la technologie, est sans équivoque dans la pensée de Kuhn. Il admet que l'appareillage de Foucault pour montrer que la vitesse de la lumière est plus grande dans l'air que dans l'eau et

bien d'autres du même genre illustre l'immense effort et l'ingéniosité qui ont été nécessaires pour établir entre la nature et la théorie une concordance de plus en plus étroite. Ainsi en va-t-il des appareillages spécialisés comme celui de Cavendish, de la machine d'Atwood ou des télescopes perfectionnés qui ont été nécessaires pour obtenir les renseignements particuliers qu'exigeaient les applications concrètes du paradigme de Newton. D'un autre côté, ce genre de défis s'applique aussi à la quête de concordance entre les prédictions et les vérifications expérimentales souhaitées par la théorie (Kuhn, 1983, p. 56).

Enfin, lorsque Kuhn affirme que l'existence d'un réseau serré d'impératifs conceptuels, théoriques, instrumentaux et méthodologiques constitue la principale source de la métaphore qui assimile la science normale à la solution d'énigmes, nous comprenons bien que l'interaction technologie-théorie permet d'accroître l'efficacité de la recherche scientifique. Mais comment aborde-t-il les relations entre la technologie et la théorie ? Il semble, comme nous allons le voir plus attentivement, que bien souvent la théorie annonce le dispositif instrumental.

### 3.2.2.1. Préséance de la théorie sur la technologie

Parlant des équations de Maxwell et des lois de thermodynamique statistique auxquelles il attribue la même force contraignante et la même fonction, Kuhn admet que des règles de ce genre ne sont ni les seules ni les plus intéressantes de toutes celles que révèle l'étude historique. En effet, remarque-t-il :

À un niveau inférieur et plus concret que celui des lois et des théories, il y a, par exemple, une multitude d'impératifs concernant certains types d'instrumentation préférés et la manière légitime de les employer. Un changement d'attitude envers le rôle du feu dans les analyses chimiques a eu une importance capitale dans le développement de la chimie au XVII<sup>e</sup> siècle. Helmholtz, au XIX<sup>e</sup> siècle, s'est heurté à une résistance opiniâtre de la part des physiologistes quand il prétendit que l'expérimentation physique pouvait apporter des éclaircissements sur leur spécialité. Et durant ce même siècle, la curieuse histoire de la chromatographie chimique donne un autre exemple de la persistance d'impératifs instrumentaux qui, tout autant que les lois et les théories, ont imposé aux scientifiques les règles de leur jeu. Nous trouverons, en étudiant la découverte des rayons X, les raisons d'être d'autres impératifs du même genre. (Kuhn, 1983, p. 67).

Dans ce passage, le philosophe des sciences semble accorder une égale dignité tant à la partie théorique qu'à son pendant instrumental. Mais, comme il le dit lui-même dès le début de cet extrait, la multitude d'impératifs se rapportant à certains types d'instrumentation reste à un niveau inférieur. Pour nous en convaincre, référons-nous à ce passage où il soutient qu'en fait la relation entre le paradigme qualitatif et la loi quantitative est si étroite et générale que, depuis Galilée, un paradigme a souvent permis de deviner sans erreur la forme de ces lois, nombre d'années avant qu'un appareillage soit mis au point pour le déterminer expérimentalement (Kuhn, 1983, p. 53). En outre, le savant n'est pas uniquement celui qui explore et qui mesure, il est aussi contraint de démontrer, par l'analyse de son appareillage, en termes compatibles avec les fondements établis de la théorie optique que les nombres donnés par son instrument sont ceux que la théorie admet comme longueur d'onde. Nous sommes tentés de dire que, pour l'historien des sciences de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, point d'instrument sans théorie préalable. Sur ce point la proximité avec Hanson est évidente. En effet, l'auteur de *Patterns of Discovery* affirmait qu'il y a un sens dans lequel voir est une entreprise théoriquement chargée ou *theory-laden*. Dans l'optique qui est la sienne, l'observation d'un phénomène donné est dominée par la connaissance préalable de ce même phénomène. Par ailleurs, nos observations reposent sur la langue ou la notation utilisée pour exprimer ce que nous savons. Sans elles, il ne nous serait guère possible de reconnaître quoi que ce soit comme des connaissances<sup>54</sup>. Pour Hanson, donc, le langage d'observation est indissociable de la langue en laquelle il est profondément ancré tout comme la compréhension contemporaine ne peut faire fi de l'histoire.

---

<sup>54</sup> Pour plus de détail à ce sujet, voir Norwood Russell Hanson. 1965. *Patterns of Discovery – An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*, Cambridge University Press, London [1<sup>st</sup> ed. 1958]. « There is a sense, then, in which seeing is a 'theory-laden' undertaking. Observation of x is shaped by prior knowledge of x. Another influence on observations rests in the language or notation used to express what we know, and without which there would be little we could recognize as knowledge. », p. 19.



Kuhn, estime que quand les savants adoptent de nouveaux instruments et que leurs regards s'orientent dans une nouvelle direction, c'est qu'ils auront auparavant été guidés par un paradigme révolutionnaire. C'est ce qui explique que « durant les révolutions, les scientifiques aperçoivent des choses neuves et différentes, alors qu'ils regardent avec des instruments pourtant familiers dans des endroits qu'ils avaient pourtant déjà examinés. » (Kuhn, 1983, p. 157). L'autre rôle dévolu à la nécessaire prééminence de la théorie sur l'instrumentation est que le paradigme sert de garde-fou à la bonne conduite de l'activité scientifique en limitant ce qui pourrait, autrement, conforter les accusations de relativisme portées par certains de ses détracteurs (Kuhn, 1983, p. 217-218). Cependant, l'antériorité de la théorie sur la pratique, notamment expérimentale, n'exclut pas une sorte de dialogue entre ces deux entités que Serge Robert nommerait « interactions » et dont Gaston Bachelard dirait qu'elles « se comprennent ». En effet, selon ce dernier :

De même qu'une technique particulière enjoint de bâtir une ville entière, une ville-usine pour créer quelques atomes de plutonium, pour loger quelques corpuscules de plus dans l'infime noyau d'un atome pour y susciter une énergie monstrueuse, une énergie sans commune mesure avec les forces de la tempête, de même une énorme préparation théorique réclame l'effort de toute la cité théoricienne.

Et les deux sociétés, la société théoricienne et la société technique, se touchent, coopèrent. Ces deux sociétés *se comprennent*. C'est cette compréhension mutuelle, intime, agissante qui est le fait philosophique nouveau. Il ne s'agit pas d'une compréhension *naturelle*. (Bachelard, 1951, p. 9-10).

### 3.2.2.2. Cas de problème qui passe des expérimentateurs aux théoriciens

Une situation similaire d'antériorité de la théorie sur l'expérience a été relatée au chapitre VI de *La structure des révolutions scientifiques* quand, peu après 1815, les problèmes techniques auxquels une philosophie relativiste de l'espace devait finalement être reliée ont commencé à pénétrer la science normale avec l'acceptation de la théorie ondulatoire de la lumière. Mais aucune crise n'en découla jusque vers 1890. En fait, l'adoption de la lumière comme mouvement ondulatoire propagé dans un éther mécanique gouverné par les lois de Newton implique que les observations célestes et les expériences terrestres devraient être capables de déceler



un mouvement relatif à travers l'éther. Pour ce faire, seul le recours aux observations d'aberration fut à même de procurer l'exactitude suffisante à la mesure de la qualité des renseignements attendus. Du coup, la détection du mouvement à travers l'éther par des mesures d'aberration devint pour la science normale un problème de taille. Afin de le résoudre, on construisit beaucoup d'appareils spéciaux. Ces équipements ne décelèrent pourtant aucun mouvement observable et le problème passa des expérimentateurs et observateurs aux théoriciens :

Pendant plusieurs décennies au milieu du siècle, Fresnel, Stokes et d'autres donnèrent différentes versions de la théorie de l'éther susceptibles d'expliquer l'impossibilité d'observer un mouvement. Chacune de ces versions supposait qu'un corps en mouvement entraîne avec lui une certaine fraction de l'éther. Et chacune réussissait suffisamment à expliquer les résultats négatifs non seulement des observations célestes, mais aussi des expériences terrestres, y compris l'expérience célèbre de Michelson et Morley. Il n'y avait toujours pas de conflit profond, sauf celui existant entre les diverses versions qui en l'absence de techniques expérimentales convenables ne devint jamais un conflit aigu. (Kuhn, 1983, p. 109).

Ainsi, les techniques expérimentales appropriées peuvent provoquer une crise ou, à tout le moins, aider à approfondir les débats qui peuvent mener au « colmatage » de la théorie, si ce n'est à son abandon pur et simple pour une concurrente. Une fois de plus, c'est la théorie qui reprend la main en cas d'infécondité des dispositifs techniques spéciaux mis en place pour la conforter. C'est donc le théoricien qui est mis en cause et non l'expérimentateur.

Par contre, quand la postface de l'ouvrage prétend que de nouveaux instruments, comme le microscope électronique, ou de nouvelles lois, comme celles de Maxwell, peuvent se développer dans un domaine tandis que leur assimilation crée une crise dans un autre domaine (Kuhn, 1983, p. 247), nous nous demandons s'il est possible d'envisager une certaine primauté de la technologie sur la théorie. Car, nous savons que la technologie peut servir de base d'élaboration paradigmatique puisque Coulomb fut capable de concevoir un appareillage dont le résultat put être intégré au paradigme (Kuhn, 1983, p. 61) et que l'énigme n'est pas seulement conceptuelle ou mathématique, elle peut être instrumentale (Kuhn, 1983, p. 62). Ce qui signifie

qu'il est possible que des appareils homogènes et simples puissent être utilisés pour élaborer des paradigmes (Kuhn, 1983, p. 60).

### 3.2.2.2. Préséance de la technologie sur la théorie

Lorsque Kuhn affirme que le savant qui s'efforce de résoudre un problème défini par le savoir et les techniques existants ne cherche pas simplement au hasard autour de lui, il sait ce qu'il veut réaliser. Il conçoit donc son appareillage (d'abord) et oriente ses réflexions (ensuite) en conséquence (de l'appareil qu'il a conçu). Il en découle qu'une nouveauté inattendue ou une découverte nouvelle ne peuvent apparaître que dans la mesure où ce que le savant attend de la nature et de ses instruments se trouve démenti. Le cas échéant, l'importance de la découverte qui en résulte sera souvent proportionnelle à l'étendue et la ténacité de l'anomalie qui l'aura annoncée. Mais, Kuhn ajoute, comme pour revenir sur la place qu'il vient de donner à l'appareillage : « donc, de toute évidence, il faut bien qu'il y ait conflit entre le paradigme qui a permis d'apercevoir l'anomalie et celui qui fera d'elle un phénomène conforme à la loi. » (Kuhn, 1983, p. 139).

Un autre passage de son texte permet d'accorder à la technologie une certaine préséance sur la théorie puisqu'elle peut servir à élaborer des paradigmes. En effet, Kuhn rapporte qu'au XVII<sup>e</sup> siècle, quand les recherches en électricité étaient guidées par l'une des diverses théories des effluves, les spécialistes de la question virent souvent des particules de paille rebondir loin des corps électrisés qui les avaient attirées, ou s'en détacher. Cette description correspond parfaitement à ce que les observateurs du XVII<sup>e</sup> siècle prétendaient avoir vu. Nous autres modernes, en revanche, placés devant le même appareillage verrions un phénomène de répulsion électrostatique, plutôt qu'un rebondissement mécanique ou gravitationnel, « mais historiquement (avec une seule exception universellement ignorée), on n'a pas vu la répulsion électrostatique en tant que telle jusqu'à ce que l'appareillage de grande envergure de Hauksbee eût grossi de beaucoup ses effets. » (Kuhn, 1983, p. 165). Kuhn reconnaît qu'à la suite des recherches de Francis Hauksbee, la répulsion

après électrification par contact ne fut que l'un des nombreux effets nouveaux de répulsion et qu'à la suite des recherches du scientifique anglais du XVIII<sup>e</sup> siècle, la répulsion devint soudain la manifestation fondamentale de l'électrification, comme dans un renversement de la vision en psychologie de la forme. Ce fut alors l'attraction qui dut être expliquée plutôt que la répulsion. On peut en induire qu'indubitablement, c'était grâce à l'appareillage d'Hauksbee que les phénomènes électriques visibles au début du XVIII<sup>e</sup> siècle étaient à la fois plus subtils et plus variés que ceux auxquels étaient confrontés les observateurs du XVII<sup>e</sup> siècle (Kuhn, 1983, p. 166). Le dispositif expérimental ingénieux peut donc faire jouer à la technologie les premiers rôles dans la conception et le développement du paradigme. Voyons maintenant les cas d'équivalence entre théorie et technologie proposés par l'analyse de l'historien des sciences états-unien.

### 3.2.2.3. Équilibre théorie-technologie

Parlant de la théorie de Newton, Kuhn trouve que la théorie d'Einstein pouvait être utilisée pour montrer que les prédictions faites à l'aide des équations du premier seront aussi exactes que nos instruments de mesure dans toutes les applications qui satisfont à un petit nombre de conditions restrictives. Autrement dit, en matière de précision, l'idéal à atteindre pour la théorie est la qualité de l'instrument (Kuhn, 1983, p. 142).

Sur le plan didactique, la technologie et la théorie ont une égale importance. L'apprentissage des physiciens, par exemple, est à la fois théorique et pratique. Selon Kuhn, en effet, tous les physiciens commencent par apprendre des exemples similaires dans lesquels le recours aux dispositifs expérimentaux est aussi important que la référence à la théorie. Ainsi, des problèmes comme ceux du plan incliné, du pendule conique, des orbites de Kepler sont présentés aux étudiants, et l'usage des mêmes instruments comme le vernier, le calorimètre et le pont de Wheatstone leur est enseigné. Ainsi, « à mesure que leur formation avance, les généralisations symboliques qui leur sont communes sont de plus en plus illustrées par des

exemples différents. » (Kuhn, 1983, p. 254-255). Le fait que seules les applications les plus élémentaires de l'équation de Schrödinger sont communes aux spécialistes de la physique des solides et à ceux de la théorie des champs étaye, au moins partiellement, les propos de Kuhn.

Dans bien des cas, le technologique côtoie le théorique sans qu'il ne puisse vraiment être question de prééminence ou de préséance. Kuhn défend l'idée que celui qui a appris à connaître certains instruments et en a eu l'expérience par des exemples se voit influencé par ce bagage dans ses interactions avec ceux-ci. Tout se passe ici comme s'il y avait une sorte de paradigme instrumental qui n'aurait rien à envier à la théorie-paradigme. En guise d'illustration de sa thèse, le natif de Cincinnati présente le cas suivant :

La vue de petites gouttes d'eau ou d'une aiguille se déplaçant sur une échelle numérique est une expérience perceptive primitive pour quelqu'un qui n'est pas familiarisé avec les chambres de Wilson et les ampèremètres. Il faut donc faire preuve d'esprit de réflexion, d'analyse et d'interprétation (ou bénéficier de l'intervention d'une autorité extérieure) avant de pouvoir en tirer des conclusions concernant les électrons et les courants. Mais la position de celui qui a appris ce que sont ces instruments et en a eu l'expérience par des exemples est très différente, de sorte qu'il y a des différences correspondantes dans la manière dont il réagit aux stimuli lui arrivant de ces instruments. Considérant la vapeur dans son haleine par un après-midi froid d'hiver, ses sensations seront peut-être les mêmes que celles du profane ; mais en regardant une chambre de Wilson il voit (ici littéralement) non pas des gouttelettes d'eau, mais les traces d'électrons, de particules alpha, etc. Ces traces sont, si vous voulez, des critères qu'il interprète comme indices de la présence des particules correspondantes, mais ce trajet est à la fois plus court et différent de celui qu'emprunte l'homme qui interprète les gouttelettes. (Kuhn, 1983, Postface, p. 268).

Il n'est pas facile de suivre toutes les manifestations de la dimension technologique dans la pensée de Thomas Kuhn. Cette entreprise est rendue plus ardue par les différentes déclinaisons que l'auteur donne à l'instrument ainsi qu'à l'appareillage. Nous allons voir à présent comment ces outils se déclinent sous la plume du philosophe des sciences en groupe scientifique, en organe perceuteur ou en dispositif neurologique.



### 3.2.3. Organe de connaissance et « organon » de science

#### 3.2.3.1. L'influence des appareils organiques et des instruments humains

Selon Kuhn, le groupe scientifique, dans son état normal, serait un instrument extrêmement efficace pour résoudre les problèmes ou les énigmes que définissent ses paradigmes générant ainsi, hors de tout doute, du progrès (Kuhn, 1983, p. 227). De plus, il fait figure d'« instrument remarquablement efficace » pour porter à leur maximum le nombre et la précision des problèmes résolus par le changement de paradigme (Kuhn, 1983, p. 230).

Bien que s'offusquant des limites de la psychologie de la forme relativement à sa propre théorie des paradigmes, Kuhn semble se contenter d'autres travaux dérivant de celui d'Adelbert Ames Jr lui permettant d'envisager le rôle des paradigmes sur l'expérience préalablement assimilée au cours du processus perceptif. Il considère ainsi que si l'on fait porter à quelqu'un des lunettes munies de lentilles donnant une image inversée, celui-ci commence d'abord par voir le monde à l'envers. Au début, son appareil perceptif fonctionne comme il avait l'habitude de fonctionner avant qu'il ne s'accommode de ces lunettes spéciales. Il en résulte alors une grande désorientation, « un état aigu de crise personnelle ». Mais dès que le sujet de l'expérience commence à s'adapter à son nouveau monde médiatisé, son champ visuel tout entier se remet d'aplomb, en général après un intervalle durant lequel la vision est simplement confuse. C'est seulement par la suite qu'il voit à nouveau les objets comme il les voyait avant de porter ces binocles. D'où la conclusion de Kuhn qui veut que l'assimilation d'un champ visuel préalablement anormal ait réagi sur ce champ, qu'elle l'ait modifié. Ce qui fait dire au théoricien des paradigmes qu'« au sens propre comme au sens figuré, le sujet qui s'est habitué à des lentilles donnant une image renversée a subi une transformation révolutionnaire de la vision. » (Kuhn, 1983, p. 159).

Anticipant sur l'objection qui voudrait que ce changement ne soit que le fruit de la plasticité de l'interprétation de l'observateur et non un écho de la nature de l'environnement ni celui de l'appareil perceptif, Kuhn rappelle les attitudes totalement différentes de Priestley et Lavoisier qui, bien qu'ayant vu de l'oxygène, ont eu à interpréter différemment leur observation. On peut en dire autant d'Aristote face à Galilée au sujet des pendules (Kuhn, 1983, p. 169). En outre, Kuhn admet que bien que l'homme de science les emploie, peut-être autrement, la plus grande partie des termes de son langage et des instruments de son laboratoire restent les mêmes. Par conséquent, le scientifique continue à regarder le même monde, même après la révolution paradigmatique. La science postrévolutionnaire comprend donc essentiellement les mêmes manipulations, effectuées avec les mêmes instruments et décrites dans les mêmes termes, que la science prérévolutionnaire. Du coup, « si, dans ces manipulations, quelque chose a changé, le changement se situe soit dans leurs rapports avec le paradigme, soit dans leurs résultats concrets. » (Kuhn, 1983, p. 181).

À la base de tous ces systèmes que nous venons de voir siège l'appareil neurologique. Dans l'optique de Kuhn, nous recherchons et faisons intervenir des critères et des règles. Ce qui veut dire que nous cherchons à interpréter des sensations qui sont déjà là, à analyser ce qui pour nous est donné. Ainsi, quelle que soit la manière dont nous le faisons, les processus mis en jeu doivent, en dernière instance, être neurologiques. Cela entraîne qu'ils sont, de ce fait, gouvernés par les mêmes lois physico-chimiques que celles de la perception d'une part et les battements de nos cœurs d'autre part.

Mais le fait que le système obéisse aux mêmes lois, dans les trois cas, ne nous donne pas lieu de supposer que notre appareil neurologique est programmé pour opérer de la même manière dans l'interprétation et dans la perception ou dans le battement de nos cœurs. Ce à quoi je me suis opposé dans ce livre est donc la tentative, traditionnelle depuis Descartes, mais pas avant lui, visant à analyser la perception sous l'aspect d'un processus interprétatif, d'une version inconsciente de ce que nous faisons après avoir perçu. (Kuhn, 1983, p. 265).

Par conséquent, on ne peut pas renier le fait que les *stimuli* et les appareils neurologiques de scientifiques appartenant à deux obédiences paradigmatiques différentes soient les mêmes de part et d'autre en général. On ne peut pas non plus méconnaître qu'ils ont en commun le même passé, hormis le passé immédiat. Leur programmation neurologique doit aussi être très proche grâce à leur proximité dans leur vie quotidienne et dans la plus grande part de leur vie scientifique, à l'exception d'un secteur d'expérience réduit, mais d'importance capitale (le passé immédiat provoqué par le changement de paradigme). Cependant, bien qu'ils vivent dans le même monde et emploient le même langage, ils ne peuvent pas avoir recours à un langage neutre que tous deux utiliseraient d'une manière qui conviendrait à l'expression de leurs deux théories ou même des conséquences empiriques de ces deux théories. Des divergences antérieures à l'utilisation des modes d'expression, qui les reflètent néanmoins, laissent s'installer une certaine incommensurabilité. C'est un tel décalage d'univers que produisit le transfert des métaux du groupe des composés à la catégorie des éléments, ce qui a favorisé l'apparition d'une nouvelle théorie de la combustion, de l'acidité et des combinaisons physiques et chimiques. L'instrument neurologie, malgré sa nature fondamentale, n'est donc ni un garant d'univocité ni un garant de commensurabilité interparadigmatique. « Il n'est donc pas surprenant qu'à l'occasion de ces redistributions, deux hommes qui, jusque-là, s'étaient en apparence parfaitement compris dans leurs conversations, découvrent tout à coup qu'ils réagissent au même stimulus par des descriptions et des généralisations incompatibles. » (Kuhn, 1983, p. 272-273).

### 3.2.3.2. L'instrument comme ensemble de connaissances scientifiques

En plus de compter nos organes neurologiques parmi les instruments de la science, Kuhn estime que la connaissance scientifique elle-même est un ensemble d'instruments. Le processus de résorption des révolutions, à l'image de la sélection naturelle, est la sélection par conflit à l'intérieur du groupe scientifique. « Le résultat net d'une succession de ces sélections révolutionnaires, séparées par des périodes



de recherche normale, est l'ensemble d'instruments remarquablement adaptés que nous appelons la connaissance scientifique moderne. » (Kuhn, 1983, p. 235). Par ailleurs, pour qu'un changement de paradigme produise toujours un instrument plus parfait, en quelque sens, que ceux que l'on connaissait auparavant, ce n'est pas seulement le groupe scientifique qui doit être particulier, mais le monde dans lequel ce groupe est partie prenante doit aussi posséder des caractéristiques assez spéciales dont le moins que l'on puisse dire est que nous ne savons pas grand-chose. Cela n'empêche tout de même pas que l'on puisse trouver une théorie scientifique meilleure que les précédentes non seulement parce qu'elle est un meilleur instrument pour cerner et résoudre les énigmes, mais aussi parce qu'elle donne en un sens une vue plus exacte de ce qu'est réellement la nature. En revanche, Kuhn récuse l'idée que des théories successives se rapprochent toujours plus de la vérité, ou en donnent des approximations de plus en plus exactes. En effet, pour lui, de telles généralisations ne relèvent pas de la résolution des énigmes et des prédictions concrètes qui dérivent d'une théorie, mais plutôt de l'ontologie (Kuhn, 1983, Postface, p. 279). Conscient des implications possibles de sa position, Kuhn se défend d'être relativiste. Aussi, dira-t-il, dans l'espoir de lever toute forme d'ambiguïté à ce sujet :

Je ne doute pas, par exemple, que la mécanique de Newton ne soit une amélioration par rapport à celle d'Aristote, ou que celle d'Einstein ne soit meilleure que celle de Newton en tant qu'instrument pour la résolution des énigmes. Mais je ne vois, dans leur succession, aucune direction cohérente de développement ontologique. Au contraire, par certains caractères importants - pas par tous -, la théorie générale de la relativité d'Einstein se rapproche davantage de celle d'Aristote qu'aucune des deux ne se rapproche de celle de Newton. Je comprends que l'on soit tenté de qualifier cette position de relativiste, mais je pense quand même que ce terme est inexact. Réciproquement, si cette position est du relativisme, je ne vois pas ce qui manquerait à un relativiste pour rendre compte de la nature et du développement des sciences. (Kuhn, 1983, Postface, p. 280).

Au vu de ce qui précède, nos connaissances scientifiques constituent un système instrumental particulièrement adapté porté par notre appareillage neurobiologique. Toutefois, les changements d'usage de nos dispositifs technologiques à usage scientifique peuvent-ils déboucher sur de nouveaux développements scientifiques ?



### 3.2.4. Nouvel usage, nouveaux développements scientifiques

À en croire Kuhn, un changement de paradigme « instrumental » peut induire de nouveaux développements scientifiques. Nous savons, par exemple, que les premières applications de la bouteille de Leyde furent de divertir la noblesse lors d'expériences dites de salon et de donner des commotions ou chocs électriques au public dans les foires, mais la nouvelle orientation que lui donna Franklin en changea totalement la destinée en ouvrant la voie à de nouveaux usages. C'est ainsi que, de l'avis du philosophe du *MIT*, après l'assimilation du paradigme de Franklin, les électriciens regardant une bouteille de Leyde voyaient quelque chose de différent de ce qu'ils avaient vu auparavant. En effet, l'appareil s'était métamorphosé en condensateur auquel ni la forme d'une bouteille ni le verre isolant n'étaient nécessaires. Seules les deux couches conductrices – dont l'une fut ajoutée à l'appareil original prirent alors une importance primordiale. Les comptes rendus de discussions aussi bien que les représentations graphiques montrent que ce qui fut retenu à terme, ce sont deux lames de métal séparées par un élément non-conducteur. Telle était la version finale du prototype de cette classe d'appareils. Cette évolution permit de noter d'autres effets d'induction qui recevaient une nouvelle description tout en favorisant l'apparition de phénomènes insoupçonnés (Kuhn, 1983, p. 166). Ce long processus a donné concrètement le condensateur. Ce résultat inattendu nous fait dire que la technologie expérimentale peut devenir sociale ou être socialement orientée.

Quelque chose d'assez similaire se produisit dans l'histoire de la chimie du XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècle. L'usage de la pompe à air d'abord, puis celle de la balance furent au cœur de la nouvelle orientation scientifique insufflée aux recherches sur les gaz par les savants. Le recours à la pompe en chimie commença au XVII<sup>e</sup> siècle avec les améliorations apportées à la conception de celle-ci. Au cours du siècle suivant, à une époque où l'on croyait que l'air était le seul genre de gaz, son usage combiné à d'autres procédés du même type suggérait de plus en plus fortement que l'air serait un élément actif dans les réactions chimiques. Puis, survint en 1756, la mise en

évidence par Joseph Black de l'air fixé ( $\text{CO}_2$ ) qui pouvait toujours se distinguer de l'air normal, alors qu'on pensait que deux échantillons de gaz se distinguaient seulement par leurs impuretés. Après Black, les recherches sur les gaz prirent un nouvel élan, notamment avec Cavendish, Priestley et Scheele qui mirent au point des techniques nouvelles permettant le discernement entre les gaz. Ces savants, de Black à Scheele, avaient en commun leur adhésion à la théorie du phlogistique. Scheele finit par produire pour la première fois de l'oxygène au cours d'une série d'expériences en vue de « déphlogistiquer » la chaleur. Des expériences combinées de ces savants naquit une variété si complexe d'échantillons de gaz et de propriétés nouvelles que la théorie du phlogistique en révéla ses limites explicatives. L'aboutissement du recours à des instruments dédiés fut la mise en crise de la théorie du phlogistique qui justifia les nouvelles recherches de Lavoisier sur les « airs » à partir des années 1770. Ce dernier, outre cette question pressante sur la prolifération quasi subite des gaz, était également préoccupé par le gain de poids de la plupart des corps au cours de leur combustion ou lors d'un chauffage intense. Ce phénomène était déjà bien connu de certains chimistes arabes. On pensait alors, sans vraiment convaincre, qu'un métal chauffé prenait à l'atmosphère certains éléments, hypothèse renforcée en son temps par l'assimilation progressive de la théorie gravitationnelle de Newton qui amenait les chimistes à soutenir qu'un gain de poids équivaldrait à un gain de quantité de matière. Si cette question s'était faite de plus en plus pressante au XVIII<sup>e</sup> siècle, ce fut d'abord, selon Kuhn, parce qu'on utilisait de plus en plus la balance comme appareil normal de recherche chimique, mais aussi parce que, le développement de la chimie des gaz ayant rendu possible et désirable la rétention des produits gazeux des réactions, les chercheurs découvraient de plus en plus de cas dans lesquels le chauffage s'accompagnait d'une augmentation de poids. S'en suivit une inflation d'hypothèses qui n'aboutit pas au rejet de la théorie, mais incitait un nombre croissant d'études particulières où la question du gain de poids tenait la première place. L'une d'elles dont l'auteur ne fut nul autre que Antoine-Laurent de Lavoisier fut lue à l'Académie française au début de 1772 (Kuhn, 1983, p. 105-107).

### 3.2.5. Conclusion : les raisons de la technologie externalisée

À l'issue de cette brève rétrospective, on pourrait se demander si l'invention du microscope à effet tunnel aurait un effet similaire à celui des technologies expérimentales décrites par Kuhn et dont nous avons pu voir la puissance heuristique.

Notons que la composition des équipes travaillant dans le champ des nanotechnosciences est bien plus hétéroclite que le cercle de spécialistes auquel Kuhn fait allusion. En effet, celles-ci sont loin de regrouper des acteurs « ayant la même activité professionnelle ». Cette entorse à la théorie des « communautés scientifiques » de l'historien des sciences du *MIT* pourrait avoir pour conséquence de ruiner ses conclusions en élargissant la portée des groupes professionnels compétents. Dans cette optique, les membres d'un seul groupe ne pourraient plus prétendre détenir la compétence exclusive des réalisations professionnelles de leurs membres puisque les nanotechnoscientifiques ne seraient pas issues de la même matrice disciplinaire. Une telle possibilité pourrait mettre en cause la thèse de Kuhn.

Nous avons pu voir les nombreux usages de ce que l'on pourrait appeler des déclinaisons des concepts technologiques dans la pensée de Kuhn. Il appert ainsi que l'instrument ou l'appareil peuvent revêtir une dimension physique ou métaphorique. Même si la position de l'historien des sciences a pu paraître ambiguë par moment, le patronage du paradigme est quasi permanent aux différents niveaux de manifestation des technologies que nous tenons pour expérimentalement orientées. Et pourtant, à tous les niveaux de l'ouvrage de Kuhn, la technologie apparaît comme tout à fait nécessaire à une activité féconde de la science. En fait, elle lui est indispensable. Cependant, ce recours sporadique, mais non moins fondamental, à la technologie dans la science qui peut sembler tourner à l'avantage de l'une ou l'autre par moment se fait au prix de multiples interactions beaucoup plus complexes que l'on ne pourrait le croire.



Il ressort de cette enquête sur la place accordée à la technologie par Kuhn, qu'en fait, sans en ignorer ni l'impact ni l'importance, le philosophe des sciences subordonne le technologique au théorique ou, pour parler comme Gilbert Hottois, l'« externalise ». Il reste tout de même clair que les relations entre technologie et théorie permettent d'accroître l'efficacité de la recherche et favorisent par ricochet les progrès sociaux. Mais, selon Kuhn, personne ne consacre des années à mettre au point un meilleur spectromètre ou à trouver une meilleure solution au problème des cordes vibrantes, simplement en raison de l'importance des renseignements que l'on obtiendra puisqu'en calculant des calendriers ou en effectuant d'autres mesures avec un instrument déjà connu on pourrait obtenir des renseignements tout aussi importants. Mais, concède-t-il, une telle activité est généralement dédaignée par les scientifiques parce qu'elle ne fait que reprendre des procédés déjà utilisés (Kuhn, 1983, p. 61). C'est donc, en partie, la peur de la routine qui justifie ce désintérêt. Il semble pourtant clair au philosophe que « mener jusqu'à sa conclusion un problème de recherche normale, c'est trouver une voie neuve pour parvenir à ce que l'on prévoit et cela implique la résolution de toutes sortes *d'énigmes* sur les plans instrumental, conceptuel et mathématique. » (Kuhn, 1983, p. 62).

L'autre raison profonde de la méfiance de Kuhn vis-à-vis de l'instrument, de la technologie, est à chercher dans le fait que la recherche normale cumulative doit son succès au fait que les scientifiques peuvent régulièrement choisir des problèmes susceptibles d'être résolus en s'appuyant sur des concepts et des techniques instrumentales proches de ceux qu'ils connaissent déjà. Sa crainte expressément formulée est que le désir de s'attaquer à tout prix à des problèmes utiles, sans considérer leurs rapports avec le savoir et les techniques existants, puisse très facilement inhiber le développement scientifique (on a envie de dire : « tout le contraire des nanotechnologies actuelles ! »). Les problèmes que tente de résoudre le savant doivent être définis par le savoir et les techniques existants et bien se concevoir dans sa tête. Il a néanmoins besoin de concevoir son appareillage et orienter ses réflexions en fonction de ce qu'il veut réaliser. De ce fait, une nouveauté inattendue ou une découverte novatrice ne pourraient apparaître que dans la mesure



où ce que le chercheur attend de la nature et de ses instruments se trouve démenti. La découverte qui en résulterait sera souvent proportionnelle à l'étendue et la ténacité de l'anomalie qui aura permis de le mettre en évidence. Le conflit entre le paradigme, révélateur de l'anomalie, et celui qui la normalisera plus tard est donc nécessaire (Kuhn, 1983, p. 139). Et, *last but not least*, Kuhn tient à se prémunir de toute accusation de relativisme en privilégiant l'exigence d'une rationalité paramétrée par le paradigme plutôt que sur la créativité et l'imaginaire potentiellement débridés du technologique.

En définitive, malgré toutes les concessions faites aux appareillages technologiques tout au long de *La structure des révolutions scientifiques*, force reste à la théorie comme le remarque si bien Hottois en parlant du philosophe des paradigmes :

Après avoir souligné le progrès des sciences et refusé de l'expliquer en recourant à la notion réaliste d'approximation de la vérité ontologique, il considère brièvement les théories successives comme des instruments toujours meilleurs, mais il ne poursuit pas sur cette voie instrumentaliste. Ailleurs, il assimile les paradigmes stables, non évolutifs (telle « l'optique géométrique »), à des « outils techniques ». La technologie matérielle est d'ailleurs d'une certaine façon intégrée aux paradigmes, mais seulement dans la mesure où cela n'affecte pas la nature logothéorique de la science. La technologie peut être considérée comme une sorte de prolongement physique de la logothéorie, comme une matérialisation partielle du filet symbolique jeté sur l'expérience. Elle sert l'observation, la description, la représentation suivant des perspectives diverses ; elle n'est pas reconnue comme intervention, opération physique de la réalité, ou si elle l'est, c'est en tant qu'activité extérieure à la science. Dernière indication de cette extériorité : Kuhn caractérise la civilisation européenne, qui remonte à la Grèce ancienne, par la science, non par la technologie commune à toutes les civilisations. (Hottois, 2004a, p. 56).

Mais, jusqu'à quel point la philosophie de Thomas Kuhn pourrait-elle faire figure de philosophie des nanotechnosciences ? C'est la question que nous comptons examiner à présent.

### 3.3. Limites de l'approche kuhnienne face à la nanotechnoscience

L'approche kuhnienne comporte plusieurs limites dès lors qu'on la confronte aux nanotechnosciences. Celles-ci pourraient être liées d'abord au déphasage entre le paradigme et la pluridisciplinarité, ou plus exactement l'interdisciplinarité consubstantielle à l'univers des nanos, puis à l'externalisation de la technologie du système de Kuhn. Pour mieux comprendre la disqualification de la théorie des paradigmes au titre de philosophie des nanotechnosciences, il nous semble important de revenir sur la place occupée par la technologie tant dans les nanos que dans le paradigme kuhnien lui-même.

#### 3.3.1. Nanotechnoscience et technologie

Comme nous avons tenté de l'établir précédemment, il y a quelque chose de suspect à vouloir coûte que coûte opposer science et technologie. Tout au long de notre chapitre 2, nous avons essayé de montrer que l'avènement de l'instrumentation à l'échelle moléculaire a eu raison des clivages traditionnels qui avaient consacré les oppositions tranchées entre science et technologie, nature et culture, etc. Rappelons qu'avec la nanotechnoscience on manipule pour connaître et on ne connaît qu'en manipulant. Ce déterminisme du nanomètre justifie amplement l'enchevêtrement entre science et technologie. Céline Lafontaine décrivait bien ce que l'on semble découvrir comme une sorte d'intrusion du technologique dans le scientifique quand elle parlait de « primauté épistémologique accordée à la manipulation<sup>55</sup> » (Lafontaine, 2010, p. 83). Selon elle, ce renversement de situation apparemment à l'avantage des technologies atteste du développement d'un modèle technoscientifique où le connaître est assujéti au faire. Du coup les frontières entre sciences et technologies à l'échelle de l'infiniment petit sont évanescences.

En fait, si l'on en croit Jan C. Schmidt (2011), les technosciences et les sciences

---

<sup>55</sup> Voir aussi notre sous-chapitre « 2.5.2. L'apport des nouveaux outils qui nous ont ouvert le champ des nanos ».

modernes dépendent fortement de l'instrumentation et de l'expérimentation, de l'intervention et de la construction. De son avis, la base technique a été accentuée par le nouvel expérimentalisme et l'ancien constructivisme méthodologique. Se référant au propos de Hacking<sup>56</sup> dans *Representing and Intervening* (1983), il souligne le fait que nous observons des objets ou des événements avec des instruments puisque les choses que nous sommes capables de voir dans la science du XX<sup>e</sup> siècle ne peuvent que rarement être observées par l'Homme à l'aide de ses sens uniquement. Sans intervention, façonnage et manipulation, il n'y a pas de méthodologie scientifique. En outre, évoquant Knorr Cetina (1999) et Kastenhofer (2007) tour à tour, Schmidt soutient que considérer l'expérimentation et l'intervention signifie concevoir la science ou la technoscience à partir d'une perspective d'action théorique comme processus et pratique impliquant divers acteurs et actants dans des cultures épistémiques différentes ou convergentes. Ainsi, la science moderne devenue synonyme de technoscience fait, crée et construit des faits tout en fabriquant des connaissances. Par ailleurs, Bruno Latour n'utilise plus le mot « technoscience » que pour décrire tous les éléments liés aux contenus scientifiques, sans tenir compte du fait qu'ils puissent sembler dégoûtants, inattendus ou étranges. En fait, il met l'accent sur l'activité scientifique plutôt que sur les définitions qu'en donnent les scientifiques ou les philosophes (Latour 1987, 174). D'un autre côté, selon la théorie des réseaux d'acteurs et le matérialisme relationnel, la connaissance technoscientifique semble être construite socialement et techniquement. Le contexte de la découverte, de la construction et de la création, en contraste avec le contexte traditionnel très apprécié de la justification, par rapport à des propositions, des lois et théories, connaît un regain d'intérêt<sup>57</sup>. À ce propos, il nous paraît clair que la nanotechnoscience prend résolument place dans ce que Hans

---

<sup>56</sup> Extrait de l'ouvrage de Ian Hacking, *Representing and Intervening*, 1983, p. 168 : « Although there is a concept of 'seeing with the naked eye', scientists seldom restrict observation to that. We usually observe objects or events with instruments, The things that are 'seen' in twentieth-century science can seldom be observed by the unaided human senses. » p. 168.

<sup>57</sup> Pour plus de détails sur ces questions, voir Jan C. Schmidt, « Toward an epistemology of nanotechnosciences », p. 109, in *Poiesis & Praxis*, December 2011, Volume 8, Issue 2-3, p. 103-124. Accessible en ligne sur <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10202-011-0104-z> (consulté le 02/12/2011).

Reichenbach (Reichenbach, 1938) a identifié sous le nom de contexte de découverte. C'est seulement quand celui-ci s'avère fécond qu'apparaît une certaine logique et que la technoscience évolue vers la nanotechnologie ou la nanoscience plus favorable aux exigences du contexte de justification.

Pour ce qui est de la préséance de la théorie sur la technologie ou de cette dernière sur la science, Ian Hacking estime qu'il existe au moins autant de modes de représentation que de types de spéculation. Aussi y avait-il des modèles physiques illustrés par l'explication de l'effet Faraday que fournit Kelvin d'un côté et les structures mathématiques de l'autre :

Ces deux approches ont mené à des découvertes remarquables. En ce qui concerne la science du XIX<sup>e</sup> siècle, on a souvent prétendu, à tort, que les physiciens allemands favorisaient l'approche mathématique tandis que les physiciens anglais se spécialisaient plutôt dans les modèles physiques. En fait les deux voies sont étroitement imbriquées et les chercheurs impliqués dans l'une ou l'autre en viennent souvent à découvrir pratiquement les mêmes faits. Plus encore, la plupart des modèles physiques, dont celui de Maxwell, s'avèrent à plus ample examen mettre en œuvre des structures abstraites. Ainsi, la mécanique statistique de ce dernier ne se composait pas de particules concrètes, mais d'équations différentielles sans signification physique immédiate. Inversement, en Allemagne, les mathématiques appliquées reposaient essentiellement sur la description de modèles physiques. Ces diverses facettes de l'esprit humain ne sont pas, en général, séparables, elles continueront à s'influencer et à se transformer suivant des processus que nous ne pouvons prévoir. (Hacking, 1989, p. 344).

Ainsi, théories et applications ne constitueraient que les deux faces d'une même médaille et l'enchevêtrement science-technologie ne souffre d'aucune ambiguïté tout comme nanotechnoscience et technologie. Alors que Kuhn considère que l'acte de jugement qui conduit les savants à rejeter une théorie antérieurement acceptée est toujours fondé sur quelque chose de *plus*<sup>58</sup> qu'une comparaison de cette théorie

---

<sup>58</sup> Nous soulignons ce « plus » qui nous semble être un élément important dans la formulation de Kuhn et qui permet de nuancer son propos sur les facteurs autres que rationnels qui présideraient à la décision d'une communauté scientifique de changer de paradigme : « L'étude historique du développement scientifique ne révèle aucun processus ressemblant à la démarche méthodologique qui consiste à « falsifier » une théorie au moyen d'une comparaison directe avec la nature. Ce qui ne veut pas dire que les scientifiques ne rejettent pas les théories scientifiques, ou que l'expérience et l'expérimentation ne soient pas essentielles dans le processus qui les y invite. Mais ce point est capital : l'acte de jugement qui conduit les savants à rejeter une théorie antérieurement acceptée est toujours fondé sur quelque chose de plus qu'une comparaison de cette théorie avec l'univers ambiant.



avec l'univers ambiant, l'analyse de Serge Robert de ce qu'il qualifie d'« ambiguïté épistémologique de la théorie des paradigmes » (Robert, 1993, p. 179-181) souligne le fait qu'il n'y a pas de distinction suffisante entre la théorie et l'expérience pour faire de la science autre chose qu'une expérience subjective. Il remarque ainsi, plutôt sur un ton de reproche, qu'il n'y a pas chez Kuhn assez de distinction entre la théorie et l'expérience pour faire de la science une expérience véritablement objective. Cette remarque semble pencher dans le sens d'une accréditation de la philosophie de Kuhn comme philosophie des nanotechnosciences. Mais, nous verrons que l'historien des sciences ne va pas aussi loin que l'on aurait pu l'espérer sur ce terrain-là. En tout état de cause, la morphologie du concept « nano-techno-science » qui nous concerne ici est assez explicite pour lever certaines équivoques. Mais qu'en est-il de la relation établie par la philosophie des paradigmes entre ces derniers et la technologie ?

### 3.3.2. Technologie et paradigme

Comme nous l'avons vue au sous-chapitre 3.2.2. (« Relations entre technologie et théorie ») la relation entre paradigme et technologie dans la philosophie est une sorte de relation amour-haine qui fait que Kuhn reconnaît bien la nécessité de la technologie quasiment à tous les niveaux de l'activité scientifique, mais il ne se résoudra jamais à lui accorder une place autre que celle d'accessoire. Serge Robert<sup>59</sup>

---

Décider de rejeter un paradigme est toujours simultanément décider d'en accepter un autre, et le jugement qui aboutit à cette décision implique une comparaison des deux paradigmes par rapport à la nature et aussi de l'un par rapport à l'autre. » (Kuhn, 1983, p. 115).

<sup>59</sup> Nous reviendrons plus en détail sur la conception robertienne dans notre prochain chapitre. Voici un extrait de *Mécanismes de la découverte scientifique (Les)* à propos de ce qu'il considère comme des ambiguïtés dans la conception du théoricien des paradigmes : « La dimension épistémologique de la théorie kuhnienne de la science est cependant traversée d'ambiguïtés. D'abord, le paradigme structure la perception et le rapport à l'expérience au point où il n'y a pas d'énoncés observationnels objectifs, pas d'expériences cruciales, pas de situations vécues comme des erreurs, en somme, pas de distinction suffisante entre la théorie et l'expérience pour faire de la science autre chose qu'une expérience subjective. Mais, en même temps, il existe des anomalies, des situations imprévues par la théorie et qui lui sont irréductibles. Il y a donc une objectivité de l'expérience, qui résiste à la théorie, et qui, devant être exclue comme anomalie, n'est donc pas subsumable sous le paradigme. Dans la théorie des paradigmes, l'activité scientifique doit être à la fois une démarche subjective collective de la communauté scientifique et une certaine confrontation objective à un extérieur irréductible. Le progrès kuhnien exige d'ailleurs cette ambiguïté de la succession d'univers paradigmatiques intersubjectifs et d'une amélioration néanmoins objective dans le passage de l'un

présente bien cette particularité du paradigme kuhnien, notamment quand il admet que celui-ci structure la perception et le rapport à l'expérience au point de réduire à néant les énoncés observationnels objectifs, les expériences cruciales et les situations vécues comme des erreurs. C'est cet état de fait qui pousse Robert à assigner au paradigme une place d'expérience subjective. Cependant, selon lui, bien que cette subjectivité soit caractéristique de la matrice disciplinaire, il existe des anomalies, des situations imprévues qui sont irréductibles à la théorie. C'est pourquoi le philosophe des sciences québécois reconnaît qu'il y a une objectivité de l'expérience chez Kuhn, « qui résiste à la théorie, et qui, devant être exclue comme anomalie, n'est donc pas subsumable sous le paradigme. » (Robert, 1993, p. 179). En effet, dans la théorie des paradigmes, l'activité scientifique doit être à la fois une démarche subjective collective de la communauté scientifique et une certaine confrontation objective à un extérieur irréductible, donc à l'expérience. Pour Robert, le progrès kuhnien exige cette ambiguïté de la succession d'univers paradigmatiques intersubjectifs et d'une amélioration néanmoins objective dans le passage de l'un et l'autre. De ce fait, l'ambiguïté du rapport de la théorie à l'expérience se répercute sur la théorie du progrès. D'un autre côté, leur qualité d'univers intersubjectifs et axiologiques fermés sur eux-mêmes fait que les paradigmes sont incommensurables, chacun ayant ses problèmes propres. Il n'y a donc pas de place pour un métaparadigme susceptible de juger de façon métascientifique deux paradigmes concurrents.

---

et l'autre. L'ambiguïté du rapport de la théorie à l'expérience se répercute ainsi sur la théorie du progrès. En tant qu'univers intersubjectifs fermés sur eux-mêmes, chacun ayant ses valeurs, ses croyances métaphysiques, sa vision du monde, etc., les paradigmes sont incommensurables et chacun a ses problèmes. Il n'existe pas de métaparadigme qui permettrait de juger de façon métascientifique de la valeur comparative des différents paradigmes : ainsi, de même que chaque paradigme structure la perception d'une manière qui lui est propre, chacun peut avoir sa propre méthodologie et ses propres critères de scientificité. Si tel est le cas, on ne peut pas déterminer de critères de progrès pertinents, ni affirmer rationnellement qu'un nouveau paradigme constitue un progrès par rapport à un précédent, ni prétendre qu'un paradigme élimine les anomalies d'un autre paradigme. L'histoire des sciences serait donc empreinte d'un total relativisme, chaque paradigme étant un univers clos incomparable aux autres. Et pourtant, comme on l'a vu, Kuhn soutient que le progrès interparadigmatique est possible, qu'un paradigme peut éliminer les anomalies d'un autre et donc, implicitement, qu'il existe des critères métaparadigmatiques rationnels d'évaluations comparatives des paradigmes. » p. 179-180.

Afin de ne pas trop nous éloigner de notre point, revenons sur ce que Robert appelle une « confrontation objective à un extérieur irréductible, donc à l'expérience » et que Gilbert Hottois (2004a) qualifie d'« externalisation de la technique ». De l'avis de ce dernier, « l'implication philosophique majeure de la révolution kuhnienne est la déconstruction du réalisme ontologique et eschatologique, colonne vertébrale de la conception traditionnelle dominante de l'entreprise de savoir. » (Hottois, 2004a, p. 54). Pour ce qui est de la place de la technologie dans le système de Kuhn, Hottois estime, comme nous l'avons déjà démontré dans les sous-chapitres précédents, qu'elle est à la fois reconnue et externalisée. Selon le philosophe belge, « externalisé », terme emprunté à l'économie contemporaine, est l'attribut le plus apte à décrire la position de la technique relativement à l'entreprise de savoir dans l'optique où elle est conçue par les philosophes des sciences en général. Pour Hottois :

Externaliser, c'est confier une activité indispensable à une entreprise extérieure, soustraire. La notion d'« externalités » renvoie aussi à tous les facteurs et effets positifs et négatifs qu'une entreprise ne prend pas explicitement en compte dans son calcul des coûts et bénéfices. La pollution est l'exemple type d'une externalité négative pour la société ; l'éducation publique est une externalité positive pour les entreprises. La philosophie des sciences traite la technique tantôt comme une externalité positive, tantôt comme une externalité négative de « l'entreprise Science ». (Hottois, 2004a, p. 54).

La technique est donc reconnue dans le dispositif paradigmatique de Kuhn, mais elle en est tenue à bonne distance. Hottois dira qu'elle y est partout présente. En effet, dans les descriptions d'histoire des sciences de Kuhn, il est continuellement question d'appareillage, d'expérimentation, d'invention. Parfois même, le philosophe belge constate qu'il reconnaît un rôle capital à l'expérimentation :

Ainsi dans *La Tension essentielle*, lorsque l'incommensurabilité des logothéories<sup>60</sup> paraît devoir être tranchée par l'évidence des succès techniques. « Quoi qu'il en soit,

<sup>60</sup> Par « logothéorie », Hottois entend le fait que la science soit affaire de langage et de représentation. Dans le résumé qu'il donne de la première leçon de son ouvrage, il donne une description plus détaillée de ce néologisme qu'il considère comme une expression des « deux approches classiques du langage et de la signification, à savoir la référence et la signifiante. D'où les deux parties centrales de la leçon : (1) la problématisation de la philosophie des sciences à partir du primat de la référence (Wittgenstein, Hempel, Nagel, Popper) ; (2) la problématisation à partir du primat de la signifiante

et en dépit des limites de leur communication, les défenseurs de théories différentes peuvent se montrer l'un à l'autre, même si ce n'est pas toujours facile, les résultats techniques concrets qu'obtiennent ceux qui travaillent dans le cadre de chaque théorie, il ne faut guère ou pas du tout de traduction pour appliquer un critère de valeur à ces résultats. (...) Quelque incompréhensible que soit la théorie nouvelle pour les tenants de la théorie traditionnelle, le déploiement de résultats concrets impressionnants finira par en convaincre au moins quelques-uns qu'ils doivent découvrir comment ces résultats ont été obtenus<sup>61</sup>. » Mais de tels passages sont rares et, d'une manière générale, la technologie et surtout son importance ne sont ni thématiques ni présentées comme essentielles et intrinsèques pour la science. Au contraire, la technologie est marginalisée, subordonnée, externalisée. Elle reconnaît, en somme, le sort du « contexte de découverte » expulsé par les empiristes logiques de ce qui constitue proprement la science, à savoir, selon eux le « contexte de justification » logique et référentiel. (Hottois, 2004a, p. 55).

Or, nous dit Hottois, si Kuhn supprime cette distinction entre « extérieur » et « intérieur » de la science en prenant en compte les processus de recherche et de découverte comme partie intrinsèque de la science, il n'y inclut pas la technique. Ce serait, semble-t-il, sa manière de préserver, sans le dire expressément une sorte de « pureté » logothéorique ou symbolique de la science.

Cependant, peut-être à sa décharge, Kuhn reconnaît, dès la préface de son livre, qu'il n'a « rien dit du rôle du progrès technique et des conditions extérieures du développement des sciences<sup>62</sup> ». Mais il précise qu'une prise en considération explicite d'influences extérieures de ce genre ne modifierait pas les thèses principales qu'il a développées dans *La structure des révolutions scientifiques* (Kuhn 1983, p. 13). C'est ainsi qu'après avoir souligné le progrès des sciences et

---

(Kuhn, Quine, Feyerabend). En conclusion, la philosophie des sciences externalise la technique ; or, seule une internalisation de la technique dans la philosophie des sciences permettrait d'arracher celle-ci à une approche de la science essentiellement dépendante de la philosophie du langage qui se perpétue jusqu'à aujourd'hui (Kripke, Putnam). » (Hottois, 2004a, Préambule, p. 14).

<sup>61</sup> Voir à ce propos Kuhn (1990) *La tension essentielle*, p. 449.

<sup>62</sup> Voici le passage en question : « La simple existence d'un paradigme n'est pas un critère suffisant pour que l'on trouve la transition évolutive étudiée au chapitre premier. Et, ce qui est plus grave, je n'ai rien dit du rôle du progrès technique et des conditions extérieures du développement des sciences. Il suffit cependant de penser à Copernic et au calendrier pour voir que les conditions extérieures peuvent aider à faire d'une simple anomalie une cause de crise aiguë. Le même exemple illustrerait de quelle façon les conditions extérieures à la science peuvent influencer sur l'éventail des possibilités offertes à celui qui cherche à mettre fin à une crise en proposant telle ou telle réforme révolutionnaire. Une prise en considération explicite d'influences extérieures de ce genre ne modifierait pas, me semble-t-il, les thèses principales développées dans cet essai, mais elle lui ajouterait une dimension analytique de première importance pour la compréhension du progrès scientifique. » (Kuhn, 1983, p. 13).



refusé de l'expliquer par la notion réaliste d'approximation de la vérité ontologique, il considéra brièvement les théories successives comme des instruments toujours meilleurs au fil de leurs succès, mais il n'insista pas sur cette voie qui en aurait fait un instrumentaliste. Ailleurs, Kuhn assimile les paradigmes stables, non évolutifs, comme « l'optique géométrique », à des outils techniques. En effet, pour lui, défendant l'idée qu'il n'existe pas de recherche sans contre-exemple et parlant de ce qui fait la différence entre science normale et science en état de crise :

Tout à l'opposé, ce que nous avons appelé plus haut les énigmes de la science normale n'existe que parce qu'aucun paradigme accepté comme base de la recherche scientifique ne résout jamais complètement tous ses problèmes. Les très rares paradigmes qui n'ont jamais semblé le faire (l'optique géométrique par exemple) ont très vite cessé de proposer un problème quelconque de recherche et sont devenus des outils techniques. À l'exception de ceux qui sont exclusivement instrumentaux, tout problème où la science normale voit une énigme peut être considéré, d'un autre point de vue, comme un contre-exemple, et devenir ainsi une source de crise. (Kuhn, 1983, p. 117).

D'ailleurs, Hottois lui reconnaît d'avoir bien intégré la technologie matérielle aux paradigmes, même si ce n'est que dans la mesure où celle-ci n'affecte pas la nature logothéorique de sa conception de la science. De ce fait, la technologie peut être considérée comme une sorte de prolongement physique de la logothéorie, comme une matérialisation partielle du filet symbolique jeté sur l'expérience. Aussi sert-elle l'observation, la description et la représentation suivant différentes perspectives. La technologie n'est pas reconnue dans le système de Kuhn comme intervention, opération physique de la réalité, ou lorsque cela advient, ce n'est qu'en tant qu'activité extérieure à la science. Enfin, ajoute Hottois, « dernière indication de cette extériorité : Kuhn caractérise la civilisation européenne, qui remonte à la Grèce ancienne, par la science, non par la technologie commune à toutes les civilisations. » (Hottois, 2004a, p. 56).

Au terme de cette analyse, nous espérons avoir montré que la technologie n'est pas absente du paradigme, bien au contraire, elle y est omniprésente, mais toujours à la remorque de la science à laquelle elle est d'une certaine façon assujettie en jouant pour elle le rôle d'un instrument auquel on peut recourir en cas de besoin.

Maintenant, il nous reste à voir les raisons de cette externalisation de la technologie du cœur du paradigme.

### 3.3.3. Les raisons de l'externalisation de la technologie

Au risque de répéter notre point 3.2.5 (« Conclusion : les raisons de l'externalisation de la technologie » qui s'interroge sur le pourquoi de cette sous-traitance), examinons à présent les raisons qui ont présidé à cette externalisation. Même si Kuhn subordonne la technologie externalisée à la science, il demeure tout à fait clair que les liens entre ces deux entités contribuent à l'accroissement de l'efficacité de la recherche. Mais rappelons que du point de vue de Kuhn personne ne se consacre à la mise au point d'un meilleur dispositif technologique ou à la recherche d'une meilleure solution au problème des cordes vibrantes juste à cause de l'importance des renseignements que l'on souhaite obtenir. Cependant, ce type d'activité est souvent dédaigné par les scientifiques du fait de son caractère routinier et rébarbatif (Kuhn 1983, p. 61). Il semble donc que la platitude de la routine justifie, en partie, le désintérêt des scientifiques pour l'expérimentation, même si Kuhn reconnaît l'importance heuristique de mener jusqu'à leur terme les problèmes de recherche normale. C'est pourquoi d'ailleurs il recommande de ne négliger aucune résolution d'énigmes, qu'elles soient instrumentales, conceptuelles ou mathématiques. Cela favorise, en effet, la découverte de nouvelles alternatives capables de rencontrer nos prévisions. Une autre raison à la volonté kuhnienne de garder une certaine distance vis-à-vis de la technologie tient au fait que la recherche normale cumulative doit son succès à la liberté qu'ont les scientifiques de choisir régulièrement des problèmes susceptibles d'être résolus en s'appuyant sur des concepts et des techniques instrumentales plutôt familiers. Kuhn redoute la « jugulation » du progrès scientifique par ce qui pourrait apparaître comme le *diktat* d'une sorte de *real science*.

Enfin, Kuhn tenant à se mettre à l'abri de toute accusation de relativisme et/ou d'instrumentalisme mise sur l'exigence et la rigueur d'une rationalité encadrée par

le paradigme plutôt que sur la créativité et l'imaginaire potentiellement débridés de la technologie. En conséquence, dans la relation science-technologie telle qu'imaginée par Kuhn, force reste à la science. Gilbert Hottois soutient à propos de ce qu'il considère comme un recul, une mise à distance de la technologie par le père des paradigmes alors que les descriptions de techniques sont courantes chez lui, que :

En dépit de la portée « révolutionnaire » de ses conceptions, Kuhn demeure, sous cet aspect, un philosophe des sciences traditionnel. Il s'inscrit dans la continuité d'une philosophie de la science qui comprend celle-ci comme langage et représentation. C'est dans des textes, des livres, des manuels<sup>68</sup> que s'exprime et se dépose la science, non dans les technologies et la transformation du monde. Ce sont le contenu et le statut de ces expressions logothéoriques qui seuls importent et méritent d'être analysés, évalués, critiqués. (Hottois, 2004a, p. 56-57).

Finalement, au terme de ce que nous venons de voir, il apparaît que l'externalisation de la technologie par la philosophie de Kuhn constitue un obstacle majeur à son aspiration au statut de philosophie des nanotechnosciences.

#### 3.3.4. Conclusion : non « paradigmaticité » de la nanotechnoscience

En définitive, nous pensons avoir établi la non-conformité de la nanotechnoscience aux critères de scientificité élaborés par Kuhn en nous focalisant essentiellement sur la place accordée à la technologie par son système de paradigmes, alors que celle-ci est au cœur de la révolution nanotechnoscientifique. Rappelons que nous avons postulé qu'aucune philosophie des sciences ne saurait convenir aux nanotechnosciences si au préalable elle n'a pas donné à la technologie, donc à l'intervention, la place qu'elle mérite dans son système. Afin de nous assurer de l'inéligibilité de la théorie des paradigmes au titre de philosophie des nanotechnosciences, nous avons examiné deux relations : celle des nanotechnosciences aux technologies, puis celle du paradigme aux technologies. Ensuite, nous avons cherché à comprendre les raisons de cette « externalisation » de la technologie du domaine du paradigme. En outre, le texte de Kuhn pose clairement une question omniprésente en nanotechnoscience, celle des frontières

que l'on avait déjà beaucoup de mal à définir dans les cadres disciplinaires habituels, *a fortiori* dans l'interdisciplinarité imposée par le nano-objet.

Au sortir de cette exploration fouillée de la théorie de Kuhn, nous pouvons affirmer la non-paradigmaticité des nanotechnosciences, à l'instar de Marc J. de Vries (2006, p. 175) dont les propos suivants confortent notre analyse :

Il semble que nous avons ici un exemple dans lequel le paradigme de la « technologie comme science appliquée » échoue à rendre compte de la relation entre science et technologie. La relation entre nanosciences et nanotechnologies est beaucoup plus compliquée<sup>63</sup>.

En ce qui concerne le lien entre nanotechnoscience et technologie, nous devons conclure à un enchevêtrement sans équivoque entre nanotechnoscience et technologie. Quant aux règles qui régissent technologie et paradigme, nous avons établi le fait que le premier n'est pas absent du second. Il y occupe même une place très enviable, mais hélas pas assez importante pour qu'il puisse traiter d'égal à égal avec la théorie qui continue à rester la maîtresse incontestable du gouvernail paradigmatique. Enfin, sans discuter de la valeur des raisons qui fondent l'externalisation des technologies dans la philosophie des sciences de Kuhn, nous sommes obligés de concéder la non « paradigmaticité » des nanotechnosciences.

### 3.4. Conclusion

Comme nous l'avons vu tout au long de ce chapitre, la nanotechnoscience n'est pas conforme à l'idéal du paradigme tel que l'entend Kuhn. Il n'y a donc pas de place pour les nanotechnosciences dans ce système, non pas parce que Kuhn ne reconnaît pas l'importance de la technologie dans le paradigme, mais surtout parce que dans

---

<sup>63</sup> Extrait suivant : « It seems that here we have an example in which the 'technology as applied science' paradigm fails to account for the relationship between science and technology. The relationship between nanoscience and nanotechnology is much more complicated. » De Vries, 2006, p. 175. (Traduit par nos soins).



la logique de Kuhn le paradigme, bien souvent synonyme de théorie, précède et oriente toutes les autres activités pratiques. On peut dire que chez Kuhn, c'est la science qui mène la danse et la technologie qui danse. De ce point de vue, il est fidèle à l'idée de Hanson (*theory-laden*) sur la préséance et la primauté de la théorie, mais il occulte une dimension non moins importante, celle de la nature *technology-laden*, non seulement de la science, mais aussi de nos sociétés.

En effet, dans les nanotechnosciences, les choses semblent se passer autrement. Même si science et technologie y sont tout aussi présentes que dans l'optique kuhnienne, les privilèges comme les frontières de la science s'estompent pour laisser non seulement une place plus grande à la technologie, mais aussi pour lui laisser une partie de ses privilèges. Tout s'y passe comme si le contexte de découverte créait son propre contexte de justification ou le construisait dans son propre processus de découverte. Dans un cadre nanotechnoscientifique, il n'y a pas grand intérêt à vouloir sous-traiter la technologie puisque ce serait réduire le champ des possibilités de découverte et de justification. Or, il y a bien une *techné* omniprésente dans la nanotechnoscience. Comme le dit François Cooren à propos de la rhétorique présentée tour à tour comme une technique, une « *techné* », un art du discours, un enseignement, une science, une morale, une pratique sociale ou une pratique ludique, celle-ci serait, selon Reboul (1990, p. 8) « l'art de persuader par le discours, elle est aussi l'enseignement et enfin la théorie de cet art. » Et, Cooren de compléter en se référant à Heidegger (1958, p. 9-48) :

En tant que technique, la rhétorique possède en effet la particularité d'être théorisable mais aussi applicable, ce qui lui confère à la fois une dimension descriptive et prescriptive. Cette particularité ne s'arrête pas là. S'il s'agit effectivement d'une *techné*, c'est qu'elle vise donc à transformer un objet, à le dé-voiler en le pro-duisant. (Cooren, 1997, p. 528).

En tant qu'art ou technique du discours, la rhétorique ou l'argumentation, selon Cooren, vise donc un but. Toutefois, elle se caractérise également par le côté créatif de ce but. D'où l'idée qu'elle pourrait être considérée comme un discours non seulement intentionnel et rationnel, mais aussi créateur. Ainsi la technologie, tout

comme la rhétorique en tant que *techné*, vise à transformer un objet et, d'une certaine façon, à le dévoiler en le produisant. Enfin, François Cooren nous rappelle sur le point qui nous occupe ici la communication de Bouchard M. (1994) lors du 62<sup>e</sup> congrès de l'A.C.F.A.S<sup>64</sup> tenu à l'UQÀM en 1994. Lors de cette rencontre de la communauté scientifique, Bouchard soutenait que les Grecs concevaient la *techné* et l'*épistémé* comme deux formes de savoir complémentaires dans la recherche de la vérité. En effet, alors que l'*épistémé* dévoile la réalité immuable et éternelle, la *techné* dévoile en produisant (*poiesis*), en faisant « devenir autre », et donc en transformant. À ce titre, la *techné* peut être acceptée comme un savoir qui dévoile ce qui ne se produit pas de soi-même. Il est clair que Kuhn est bien loin d'une telle approche. D'ailleurs, à ce propos, les conclusions de Sacha Loeve que nous partageons sur cette question sont sans équivoques. Il soutient que :

La technologie produit des connaissances qui ne s'inscrivent pas dans la cadence à deux temps de l'activité scientifique selon le schéma kuhnien, alternant des périodes de « science normale » et des périodes de crise débouchant sur des « révolutions scientifiques ». Les connaissances technologiques produites *ne procèdent pas d'une révolution scientifique*, mais *ne s'inscrivent pas non plus dans l'activité monotone et disciplinée de la « science normale »*. Les connaissances technologiques sont plutôt en *constant décalage* avec les paradigmes et les disciplines. Elles mettent plutôt « à l'aventure » les paradigmes disciplinaires sans pouvoir garantir de contribuer à la résolution des problèmes qu'ils posent. (Loeve, 2009, p. 677 [c'est l'auteur qui souligne]).

D'un autre côté, notre accès à l'échelle nanométrique nous ayant ouvert à la fois la porte vers un nouvel univers, il nous a aussi fait basculer dans l'inattendu et l'émergent quasiment en permanence. La compréhension de ce nouveau paradigme nécessite moins d'arrogance théorique et plus de pragmatisme, disons, heuristique. En fait, nombreux sont les spécialistes des nanotechnosciences à reconnaître ne pas savoir à quoi s'attendre lorsqu'ils entament des recherches en nanos. L'échelle quantique réserve beaucoup de surprises, voire des bizarreries désarmantes auxquelles il faut s'habituer et qu'il faut apprendre à contrôler afin que l'inattendu redevienne attendu.

<sup>64</sup> À l'origine, Association canadienne-française pour l'avancement des sciences (Acfas), elle est renommée en 2001. Elle devient alors l'Association francophone pour le savoir, et l'acronyme Acfas est conservé. Site Internet : <http://www.acfas.ca/>.

Avec les nanotechnosciences actuelles, au mieux nous sommes dans un cadre descriptif et explicatif, mais en aucun cas prédictif. En effet, elles ne prédisent pas grand-chose et ne prétendent même pas expliquer quoi que ce soit, si l'on en croit certains experts, tout au moins (Joachim, 2010). Nous savons de façon générale qu'une science va chercher à expliquer et qu'une technologie s'appliquera à faire. Néanmoins, dans une perspective hempelienne, si l'on sait expliquer une chose, il y a de fortes chances pour que nous puissions nous en servir comme fondement pour une prédiction. Par ricochet, si nous savons faire quelque chose, il y a de bonnes raisons de penser que nous saurons l'expliquer aussi. Cependant, de ce que nous connaissons présentement sur les nanotechnosciences, il n'y a rien de vraiment concluant en terme de prédiction, par contre la volonté d'expliquer et surtout de décrire les phénomènes à l'échelle nanométrique domine toutes les activités autour des nanos. Il faut noter aussi que rien dans la définition du concept « nanotechnoscience » ne permet de considérer cette activité comme une simple technologie à l'échelle de l'infiniment petit. Autrement dit, les nanotechnosciences ne sont pas une technologie à laquelle on a adjoint le préfixe *nano* pour circonscrire son domaine d'action. En fait, c'est bien plus que cela, à un tel point que l'on ne sait pas vraiment faire la part des choses entre ce qui relève de la technologie ou de la science dans les nanotechnosciences. Cette confusion conceptuelle Sacha Loeve (Thèse de Doctorat, 2009), nous l'avons vu au chapitre précédent, l'estime volontaire de la part des acteurs influents impliqués dans le développement de cette nouvelle discipline « scientificotechnologique » encore en construction. Pour lui, ce vague ou flou définitionnel n'est rien d'autre qu'une astuce pour attirer le maximum de chercheurs et d'univers de recherche autour de cette activité émergente. Une telle analyse pousse à la prudence épistémologique et nous incite à jeter un regard à la fois perplexe et inquisiteur sur tous les effets de *buzz* et de *hype* que d'aucuns ont jugé comme étant caractéristiques du phénomène nanotechnoscientifique.

Avant de soumettre notre question aux thèses du « faillibilisme sophistiqué » de Lakatos et au « correctionnisme » de Robert, il convient de préciser et de rappeler certaines caractéristiques des nanotechnosciences. Rappelons donc qu'entre autres raisons, la prédominance de l'aspect R&D dans ce que nous appelons aujourd'hui abusivement « nanotechnologies » a fini de nous convaincre d'adopter le concept « nanotechnoscience » (plutôt que le premier plus couramment usité) qui nous semble seoir davantage à une description rigoureuse de toutes les dimensions à l'œuvre dans cette activité technoscientifique. Elle se positionne en antichambre d'une science et d'une technologie toutes les deux tournées résolument vers l'échelle atomique. Il nous semble qu'en faisant ce choix, nous faisons plus qu'opérer un simple revirement conceptuel. En effet, il s'agit pour nous d'insister sur le caractère inouï impliqué par la découverte du microscope à effet tunnel qui a ouvert aux chercheurs et ingénieurs un nouveau monde comparable à celui que la découverte du télescope a permis de « voir ». Nous savons que de l'amélioration de cet instrument d'observation révolutionnaire au XVII<sup>e</sup> siècle, Galilée a pu initier une révolution scientifique qui a été à l'origine de la science moderne. Peut-être en sera-t-il de même pour la découverte des nanoscopes qui permettent aujourd'hui l'« observation » et la manipulation des atomes et des molécules. Il est encore tôt pour le dire, même si l'on peut se risquer à tenter une conjecture optimiste et prédire une révolution scientficotechnologique à la mesure des bouleversements introduits par cette nouvelle génération d'instruments. Vues sous cet angle, les nanotechnosciences pourraient impliquer une sorte de retour vers le futur technique qui reprendrait les premières conceptions mécaniques avant leur complexification croissante vers l'élaboration de systèmes théoriques et technologiques. Mais, étant donné l'inadéquation de la doctrine kuhnienne que nous venons de mettre en lumière, que pourraient apporter Lakatos et Robert à ce débat autour de la question de l'existence ou non d'une philosophie des nanotechnosciences ?



## CHAPITRE IV

### QUELLE HEURISTIQUE POUR LES NANOTECHNOSCIENCES ?

Imre Lakatos introduit le premier volume de ses *Philosophical Papers* en proposant une distinction entre ce qui relève de la science proprement dite et ce qui devrait en être exclu. Dès ses premières phrases, il annonce l'importance que revêt la science pour l'humain, mais aussi les enjeux d'une démarcation entre ce qui en relève et ce qui s'en éloigne :

Le respect que l'homme voue à la connaissance est l'une de ses caractéristiques les plus particulières. Connaissance en latin se dit *scientia*, et science est devenu le nom de la forme de connaissance la plus respectable. Mais qu'est-ce qui distingue la connaissance de la superstition, de l'idéologie ou de la pseudoscience ? L'Église catholique a excommunié les Coperniciens, le Parti communiste a persécuté les Mendéliens au motif que leurs doctrines étaient pseudoscientifiques. La démarcation entre science et pseudo-science n'est pas seulement un problème de philosophie de cabinet, il est d'une pertinence sociale et politique essentielle<sup>65</sup>.

Cet intérêt particulier que nous portons à la science ainsi que les implications sociales et politiques essentielles de celle-ci fait de la question de la démarcation un problème fondamental. À ceux qui pensent qu'« une assertion est une connaissance si suffisamment de gens y croient suffisamment fortement », Lakatos rétorque ceci :

(...) l'histoire de la pensée nous montre que beaucoup de gens ont été totalement engagés à des croyances absurdes. Si la force des croyances était une caractéristique de la connaissance, nous devrions avoir à classer les contes sur les démons, les anges, les diables, et du ciel et de l'enfer comme connaissance. Les scientifiques, d'autre part, sont très sceptiques, même à propos de leurs meilleures théories. La théorie de Newton est la plus puissante que la science a jamais produite, mais Newton lui-même n'a jamais cru que les corps s'attirent à distance. Donc ce n'est pas le degré d'engagement

---

<sup>65</sup> Lakatos, « Science and Pseudoscience », in Lakatos, *Philosophical Papers*, vol. 1, Introduction  
« \*Cet article a été rédigé au début de 1973 et a été lu sous forme de conférence à la radio. Il a été diffusé par l'Open University le 30 juin 1973. (Eds.) », p. 1. (Notre traduction).

envers les croyances qui en fait une connaissance. En effet, la marque d'un comportement scientifique est un certain scepticisme, même envers les théories auxquelles on tient le plus. L'engagement aveugle à l'égard d'une théorie n'est pas une vertu intellectuelle : c'est un crime intellectuel. (Lakatos, 1978a, p. 1, notre traduction).

Ainsi, poursuit le théoricien des « programmes de recherche », une déclaration peut être pseudo-scientifique, même si elle est éminemment « plausible » et que tout le monde y croit. Et, elle peut être scientifiquement valable, même si elle est incroyable et que personne ne lui accorde le moindre crédit. En outre, Lakatos estime qu'une théorie peut être d'une suprême valeur scientifique même si personne ne la comprend, et encore moins n'y croit. La valeur cognitive d'une théorie n'a rien à voir avec son influence psychologique sur l'esprit des gens. La croyance, l'engagement, la compréhension sont des états de l'esprit humain. Mais l'objectif, la valeur scientifique d'une théorie sont indépendants de l'esprit humain qui les crée ou les comprend. Sa valeur scientifique ne dépend que de l'objectivité qui sous-tend ces conjectures dans les faits. Nous verrons que la méthodologie développée par Lakatos découle de cette conception de la science qui vient d'être déclinée.

En ce qui concerne Robert, son correctionnisme est une conséquence de sa critique constructive de ce qu'il appelle, à la suite de Lakatos, « faillibilisme sophistiqué » (Robert, 1993) et que Dominique Lecourt préfère désigner par l'expression « méthodologie raffinée » (Lecourt, 2001, p. 75). En fait, Robert est lakatosien comme Lakatos est popperien et ce qu'il dit de celui-ci à l'égard de Popper lui est applicable *mutatis mutandis* dans sa relation avec le philosophe des « programmes de recherche ». Le philosophe canadien soutient, en effet ce qui suit :

Quant au programme falsificationniste, Lakatos soutient que Popper en a élaboré le noyau dur et que lui-même, en s'opposant à Kuhn et aux autres adversaires du falsificationnisme, a produit les hypothèses auxiliaires et les changements de problématiques qui ont accru sa prédictivité et sa scientificité, pour le sauver de la falsification. Ce faisant, Lakatos laisse entendre qu'il est responsable d'avoir procuré au falsificationnisme sa valeur scientifique, puisque c'est la force prédictive des hypothèses auxiliaires qui peut donner à un programme de recherche la scientificité que son noyau dur ne peut lui conférer. Ainsi, de la même façon que la découverte des isotopes a procuré de la scientificité au programme de Prout, ou que Galilée a fait de même avec l'héliocentrisme d'Aristarque de Samos et de Copernic, Lakatos considère

que, par sa théorie des programmes de recherche scientifiques, il a rendu scientifique un noyau dur d'origine poppérienne. (Serge Robert, 1993, p. 187).

Nous verrons que les critiques adressées par Serge Robert plus tard à Lakatos seront du même acabit que celles de ce dernier à l'encontre du maître du falsificationnisme. L'examen successif de ces deux « programmes de recherche » devrait nous permettre d'éclairer tant la position de Lakatos que celle de Robert, mais de plus nous y chercherons les signes d'une ouverture à la dimension technologique et expérimentale de la science à travers l'étude de la place que l'un et l'autre accordent à ces questions dans leurs philosophies des sciences respectives.

#### 4.1. Programme de recherche et correctionnisme

##### 4.1.1. Modèle lakatosien et science

Bien informé des théories antagonistes de Karl Popper et de Thomas Kuhn, Lakatos tente de les dépasser, si l'on peut dire, après une critique consciencieuse tant du premier que du second. En effet, le philosophe magyar trouve la philosophie popperienne trop évolutionniste pour rendre compte de l'histoire réelle des sciences. De son point de vue, la doctrine du Philosophe autrichien se prévaut d'une approche normativiste pour ne pas tenir compte de l'histoire pour se construire. Mais peut-être était-ce pour ne pas retomber dans les travers de l'inductivisme que le falsificationnisme de Popper s'est acharné à réfuter depuis 1934, année de la parution de *La logique de la découverte scientifique* ? En tout cas, une chose est établie : les scientifiques n'abandonnent pas leurs théories simplement parce qu'elles seraient confrontées à un contre-exemple. Popper lui-même est une parfaite



illustration de cette idée selon les anecdotes que nous tenons de Luce Giard<sup>66</sup>, commentateur de Lakatos et de Donald Gillies<sup>67</sup>, ancien étudiant de celui-ci.

Selon Giard, Lakatos, de commentateur zélé « au service des théories de Popper », est devenu son plus fidèle critique. Ce qui lui fait dire qu'« en fait, la distance entre les deux hommes se creusa à mesure que Lakatos explicita par écrit ses critiques de Popper et que celui-ci en prit connaissance dans la phase de préparation des actes du colloque<sup>68</sup>. » Pour Giard, c'est à partir du moment où Lakatos prit la liberté d'« améliorer » par une critique acérée la thèse principale de Popper sur l'induction qu'il fut disqualifié pour cause d'hérésie grave. Ce crime de lèse-majesté lui valut la rancune tenace de Popper qui lui en voulut au point qu'il ne daigna même plus parler de son ancien thuriféraire. Voici ce que Giard rapporte à ce sujet :

Que l'éloignement intellectuel et personnel se soit installé entre les deux hommes dans les années suivantes, on le vérifie à la lecture de l'autobiographie de Popper, *Unended Quest*, préparée, selon l'usage de la série, pour le volume d'hommage ci-dessus mentionné, paru en 1974, l'année de la disparition de Lakatos. Dans ce récit, on ne trouve que de rares mentions de Lakatos, toutes d'un ton réservé et plein de froideur. Le plus triste, c'est peut-être de constater que même la mort de Lakatos ne parvint pas à adoucir l'irritation et la déception de Popper. En effet, la version révisée de l'autobiographie, publiée en un petit livre à part en 1976, ne montre aucun changement dans les trois passages concernant Lakatos. Le premier mentionne la terminologie proposée par Lakatos pour désigner les « changements de problèmes dégénératifs », expression à laquelle Popper semble accorder une approbation implicite. Le second fait référence à l'article de Lakatos sur la logique inductive [1968b], pour déplorer l'incompréhension que ce texte manifeste à l'égard de la pensée de Popper, et se termine ainsi : « Il est, je pense, impossible d'éviter toutes les méprises » ; autrement dit, Lakatos n'est jamais que l'un d'entre mes mauvais lecteurs. Le dernier passage enfin réclame au profit de Popper la paternité de l'idée de « programme de recherche métaphysique », employée, dit-il, dans ses cours dès 1949 sinon même avant et développée par écrit dans le fameux *Postscript*, prévue pour faire suite, vingt ans après, au livre de 1934. Par un concours de circonstances assez compliqué, ce livre resta à l'état d'épreuves imprimées pendant fort longtemps (il fut publié en trois

<sup>66</sup> Voir l'introduction de Luce Giard dans *Histoire et méthodologie des sciences*, p. XIV-XVII.

<sup>67</sup> Voir aussi la conférence de Donald Gillies, Department of Science and Technology Studies, University College London, « Lakatos, Popper, and Feyerabend: Some Personal Reminiscences », Talk at UCL on 28 February 2011. [<http://www.ucl.ac.uk/silva/sts/staff/gillies> (accédé le 17/03/2011)].

<sup>68</sup> Il s'agit du colloque de philosophie des sciences organisé en juillet 1965 conjointement par la *London School of Economics* et la *British Society for the Philosophy of Science*. Bar-Hillel, Paul Bernays, Carnap, Alonzo Church, Heyting, Hintikka, S.C. Kleene, W. Kneale, Kreisel, Kuhn, Ruth Marcus, Quine, Popper, Abraham Robinson, Patrick Suppes et Tarski y étaient présents. de 1965 organisé sous l'égide de Popper. (Cf. Introduction de Luce Giard dans *Histoire et méthodologie des sciences*, p. XIV).



volumes à partir de 1982), mais il circula largement parmi les « collègues » de Popper, dit celui-ci, et parmi ses étudiants, selon William W. Battley III qui devait finalement en assurer l'édition. (Giard, 1994, Introduction à Lakatos, p. XV).

Gillies, quant à lui, affirme que Popper, après lui avoir avoué à l'époque que : « jusqu'à récemment, il avait pensé que Lakatos était l'une des personnes qui avait le mieux compris sa position, et que c'était une grande déception pour lui d'apprendre que ce n'était pas le cas<sup>69</sup>. » En fait, après les sérieuses critiques de son jeune collègue de la *London School of Economics (LSE)*, Popper aurait prétendu que Lakatos n'avait pas compris sa position et l'avait déformée par des citations sélectives et en omettant de mentionner quelques passages. Afin de mieux comprendre la position de Lakatos, cette querelle entre lui et Popper nous semble bienvenue pour distinguer leurs positions respectives afin de nous permettre de mieux comprendre la philosophie du Magyar. La présentation de Gillies met le doigt sur l'existence de deux Lakatos. Le premier étant un fidèle admirateur et défenseur des idées de Popper et le second, critique acerbe et infatigable des thèses à la fois de son collègue et mentor, mais aussi de Thomas Kuhn dont la lecture des textes lui a permis pourtant de prendre le recul critique qui lui a valu les foudres du Maître à l'époque.

Gillies (2011) raconte que Lakatos a d'abord agi comme le champion et le défenseur de Popper. Ce qui s'est matérialisé par son montage plutôt créatif des travaux de la conférence de 1965 à *Bedford College*. Ainsi le volume sur le problème de la logique inductive pourrait être considéré comme le volume Carnap, parce que celui-ci, qui fut l'un des principaux rivaux de Popper, y a présenté un texte important et que Lakatos en réponse lui a consacré un long article pour défendre Popper contre Carnap. Selon Gillies, la production de ce volume n'avait en rien perturbé les relations entre Lakatos et Popper, puisque Lakatos a toujours préféré Popper à

---

<sup>69</sup> Conférence de Donald Gillies, Department of Science and Technology Studies, University College London, « Lakatos, Popper, and Feyerabend: Some Personal Reminiscences », Talk at UCL on 28 February 2011, p. 10. [<http://www.ucl.ac.uk/silva/sts/staff/gillies> (accédé le 17/03/2011)].

Carnap. Ce volume a été publié en 1968, mais envoyé à l'imprimerie vers la fin de l'année 1967.

Ce qui fait penser que vers la fin de l'année 1967, Lakatos était encore un grand admirateur de Popper. En revanche, si nous remontons un peu plus de cinq années plus tard, vers 1973, le tableau d'ensemble a complètement changé. Donald Gillies en tant qu'ancien étudiant de Lakatos était à la bonne place pour voir comment évoluèrent les vues de Lakatos à cette époque comme en témoigne le cours en huit conférences qu'il avait donné à la *LSE* sur la méthode scientifique. Celles-ci ont été enregistrées puis transcrites par Sandra Mitchell, avec l'aide de Gregory Currie, puis publiées par Matteo Motterlini dans son livre paru en 1999 (Motterlini 1999, p. 189 et Motterlini 2002, p. 499 – NDBP n° 21). Dans ces textes, Lakatos attaque Popper d'une manière impitoyable. Tout ce que Lakatos reconnaît encore à Popper, c'est un certain mérite à sa philosophie politique, mais il dénie toute valeur à sa philosophie des sciences, comme en attestent les propos ci-dessous prêtés à Lakatos et rapportés par le texte de Motterlini (1999, p. 89-90) :

Il semblerait que Popper et ses trois contributions majeures à la philosophie étaient les suivants : (1) son critère de falsifiabilité - que je pense être un recul par rapport à Duhem, (2) sa solution au problème de l'induction - que je pense être un recul par rapport à Hume ... et (3) son chef-d'œuvre littéraire « *La Société ouverte* par un de ses ennemis » ... comment l'appelle-t-on déjà ? *La Société ouverte et ses ennemis*. ... *La société ouverte* est franchement un chef-d'œuvre littéraire : n'étant pas un philosophe politique, je ne peux pas commenter son contenu, mais je pense que c'est un livre merveilleux. Donc, en conclusion, les deux tiers de la gloire philosophique de Popper sont basés sur une méprise.

À cette charge Lakatos ajoute un peu plus tard et sur le même ton ce qui suit : « je pense que le fait que la philosophie de Popper a survécu pendant si longtemps est un mystère sociologique. L'immortalité de Popper est garantie par ce résultat stupide. » (Motterlini 1999, p. 92). La question qui nous vient à l'esprit quand on a connu les relations naguère cordiales entre les deux hommes est celle-ci : comment cet énorme changement dans l'attitude de Lakatos vis-à-vis de Popper est-il survenu ? En fait, nous dit Gillies, lorsque le volume de Carnap a été achevé, Lakatos s'est penché sur le dernier volume des actes du colloque. On pourrait

appeler celui-ci le « volume Kuhn », car il contenait un de ses articles et divers autres documents discutant sa position. Pour Gillies, lorsque Lakatos a commencé l'édition de ce volume, son intention était de lui donner la même forme que le volume consacré à Carnap. Il avait prévu d'écrire un long article pour défendre Popper contre Kuhn. Toutefois, les idées de Lakatos ont évolué entre-temps de manière telle que cela a eu un impact différent sur son projet initial. En effet, son étude de Kuhn l'a convaincu que celui-ci avait raison sur certains points à propos desquels Popper avait tort. Ce qui ne veut pas dire que Lakatos s'est converti à la philosophie de Kuhn puisqu'il est resté aussi critique sur bien des aspects à l'égard de la position de Kuhn. Ainsi commence sa croisade contre de nombreux points de la position de Popper et la construction de sa méthodologie des « programmes de recherche » que nous allons voir bientôt.

Du coup, le volume Kuhn a finalement été publié en 1970 sous le titre *Criticism and the Growth of Knowledge*, édité par Imre Lakatos et Alan Musgrave. Il contenait un long article de Lakatos, « *Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes* » dont la traduction en français sous l'égide de Luce Giard donne « La falsification et la méthodologie des programmes de recherche scientifique ». Cependant, ce document, loin d'être une défense de Popper contre Kuhn, constitue une critique à la fois de Popper et de Kuhn. Comme nous l'avons dit plus haut, ce fut aussi l'occasion pour Lakatos de développer une nouvelle position : « La méthodologie des programmes de recherche scientifique », une position intermédiaire entre Popper et Kuhn comme en atteste le point 3 du chapitre IV de *La mécanique de la découverte scientifique* (voir p. 181) de Serge Robert.

Venons-en maintenant aux critiques que Lakatos a faites à Popper puis à la manière dont elles ont mené à la grande querelle qui a opposé Lakatos à Popper. Les critiques de Lakatos à l'encontre de Popper ont été développées quand il s'est mis à explorer les thèses de Kuhn. Cependant, nous dit Gillies, ces critiques étaient fondées non pas tant sur Kuhn que sur la thèse de Duhem. En effet, dans son texte



de 1970, Lakatos parle de la thèse Duhem-Quine, mais en fait, la philosophie de Quine eut peu d'impact sur Lakatos tandis qu'il étudiait Duhem avec la plus grande attention. Ce n'est pas par hasard que Lakatos, dans l'un des passages extraits de ses dernières conférences sur la méthode, parle de « son critère de falsifiabilité » que Gillies considère comme étant un retour à Duhem. Le passage suivant tiré de *La théorie physique* semble bien confirmer cette idée de l'ancien étudiant du philosophe des programmes de recherche :

Il serait téméraire de croire, comme Arago semble l'avoir pensé, que l'expérience de Foucault condamne sans retour l'hypothèse même de l'émission, l'assimilation d'un rayon de lumière à une rafale de projectiles ; si les physiciens eussent attaché quelque prix à ce labeur, ils fussent sans doute parvenus à fonder sur cette supposition un système optique qui s'accordât avec l'expérience de Foucault.

En résumé, le physicien ne peut jamais soumettre au contrôle de l'expérience une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble d'hypothèses ; lorsque l'expérience est en désaccord avec ses prévisions, elle lui apprend que l'une au moins des hypothèses qui constituent cet ensemble est inacceptable et doit être modifiée : mais elle ne lui désigne pas celle qui doit être changée. Nous voici bien loin de la méthode expérimentale telle que la conçoivent volontiers les personnes étrangères à son fonctionnement. On pense communément que chacune des hypothèses dont la Physique fait usage peut être prise isolément, soumise au contrôle de l'expérience ; puis, lorsque des épreuves variées et multipliées en ont constaté la valeur, mise en place d'une manière définitive dans le système de la Physique. (Duhem, 1906, p. 307).

Poursuivant son analyse sur la place qu'occupe réellement Duhem dans les nouvelles thèses de Lakatos, Donald Gillies estime que si nous acceptons cette thèse de Duhem, il semble impossible de falsifier une hypothèse isolée et donc que le critère de falsifiabilité n'est pas satisfaisant. Dans cette optique, Duhem pose la question suivante : si l'expérience n'est pas d'accord avec un groupe d'hypothèses, comment pouvons-nous savoir laquelle des hypothèses devrait être changée ? Lakatos propose sa méthodologie des programmes de recherche scientifique comme une solution à ce problème duhemien. Il a ainsi développé ses critiques de Popper et son nouveau compte-rendu non-popperien de la méthode scientifique, principalement dans les années 1968 et 1969 et c'est durant ces années que la grande querelle a éclaté entre Popper et Lakatos. Il faut ajouter que ces années ont été les dernières de Popper en tant que professeur à la *LSE* puisqu'il a pris sa retraite en 1969 à l'âge de 67 ans. Tout compte fait, l'attitude de Popper face aux assauts critiques de Lakatos montre bien qu'abandonner sa théorie juste parce qu'elle est



confrontée à un contre-exemple est plus facile à dire qu'à faire. De plus, comment pourrait-on envisager un renoncement aussi facile à une théorie présentée comme supérieure face à un contre-exemple souvent empirique ? Quelle théorie Lakatos propose-t-il pour améliorer celle de Popper et consolider la sienne en tenant compte à la fois des objections de Kuhn et des intuitions de Duhem ? Dans cette optique, John Kadvany (2001) soutient que :

La critique de Popper est imbriquée avec les histoires normatives de Lakatos visant à créer une théorie historiographique, tout ce qui constitue (...) la logique de la découverte scientifique changeante de Lakatos, ce qui signifie une méthodologie qui prend en compte son propre statut historique et transitoire. Comme Feyerabend l'a noté dans sa notice nécrologique pour Lakatos, dans la science moderne, il existe un horizon des faits en constante expansion. La méthodologie des programmes de recherche scientifique montre qu'il peut aussi bien y avoir un horizon sans cesse croissant de méthode. (Kadvany, 2001, p. 155, notre traduction).

Pour mieux aborder la philosophie des sciences du Magyar, il nous semble que la prendre sous l'angle de la méthodologie évoqué ci-dessus par Kadvany permettrait de mieux comprendre l'approche des programmes de recherche. Dans *Preuves et réfutations*, en effet, le premier ouvrage de Lakatos fruit de sa thèse et ayant un sous-titre<sup>70</sup> qui fait ouvertement référence au legs popperien, Lakatos assume clairement, non seulement sa nouvelle affiliation à Popper, mais aussi celle plus ancienne qu'il doit au mathématicien et philosophe hongrois, George Pólya. Dans ses remerciements à la version dudit document publié dans le *British Journal for the Philosophy of Science*, il affirmait déjà que son article devait « (...) être replacé dans le contexte de la relance de l'heuristique mathématique de Pólya et de la philosophie critique de Popper. » (1963-64, p. xii). Outre cette reconnaissance exprimée à l'endroit de ses deux mentors, Lakatos est plus explicite dans l'introduction du livre quand il soutient que :

---

<sup>70</sup> Voir notamment Lakatos. 1984. *Preuves et réfutations : essai sur la logique de la découverte mathématique*, Hermann traduction de la version originale de son ouvrage : Lakatos, I. (1976). *Proofs and refutations. The logic of mathematical discovery* (J. Worrall & E. Zahar, Eds.). Cambridge: Cambridge University Press qui a d'abord été publié dans le *British Journal for the Philosophy of Science*, 1963-1964b, 14, 1-25, 129-139, 221-243, 296, 342, republié dans une version révisée dans Lakatos (1978a).

L'objet de cet essai est d'aborder certains problèmes de la *méthodologie des mathématiques*. J'utilise le terme « méthodologie » dans le sens qui s'apparente à celui de « heuristique » chez Pólya et Bernays, et à celui des locutions « logiques de la découverte » ou « logique situationnelle » de Popper. La dénaturation récente du terme « méthodologie des mathématiques » pour en faire une sorte de « métamathématique » a sans conteste une odeur de formalisme. Elle indique que dans la philosophie formaliste des mathématiques, il n'y a pas de place réservée à la méthodologie en tant que logique de la découverte. (Lakatos, 1984, p. 3).

Il est évident, par ailleurs, que le titre complet de l'ouvrage : *Preuves et réfutations. La logique de la découverte mathématique* se réfère à deux des livres les plus célèbres de Popper : *Conjectures et réfutations* et *La logique de la découverte scientifique*, notamment. Cela ne veut pas dire que Popper et Pólya furent ses seules influences puisqu'il y a des signes évidents de l'influence des philosophies qu'il avait étudiées en Hongrie et qui ne sont pas l'objet de notre présente étude, à savoir le marxisme et l'hégélianisme.

Il nous semble important de bien connaître le contenu que donne Lakatos à son concept de « méthodologie » pour mieux appréhender le sens qu'il veut donner à son « programme de recherche ». Or le sens que lui donne Pólya dont il se réclame n'est rien moins que celui d'*ars inveniendi*. Ce qui n'est pas sans rappeler les débats du XVII<sup>e</sup> siècle sous l'égide de philosophes comme Bacon, Descartes et Leibniz qui opposait l'*ars inveniendi*, portée par les mathématiques et la nouvelle science expérimentale, à l'*ars demonstrandi* associé au syllogisme, et donc à Aristote ainsi qu'à la scolastique. Pólya décline la conception de la méthodologie dont se réclame son disciple et compatriote en ces termes :

Heuristique, ou heurétique, ou « *ars inveniendi* » était le nom d'une certaine branche d'étude, pas très clairement circonscrite, appartenant à la logique, ou à la philosophie, à la psychologie ou, souvent décrite, rarement présentée en détail, et aussi bon qu'oubliée aujourd'hui. Le but de l'heuristique est d'étudier les méthodes et les règles de la découverte et de l'invention. Quelques traces d'une telle étude peuvent être trouvées dans les textes de commentateurs d'Euclide ; il y a un passage de Pappus particulièrement intéressant à cet égard. Les tentatives les plus célèbres pour construire un système heuristique sont dues à Descartes et à Leibniz, deux grands mathématiciens et philosophes. (Pólya, 1973, [première édition, 1945], p. 112, notre traduction).

Le but de l'heuristique est donc d'étudier les méthodes et les règles de découverte et d'invention. Une telle approche permet à Lakatos d'entreprendre la réconciliation entre « contexte de découverte » et « contexte de justification » dont l'opposition remonte à *Experience and Prediction : an Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge* de Hans Reichenbach (1957). Ce dernier soutenait que :

Si une détermination plus pratique de ce concept de reconstruction rationnelle est recherchée, on pourra dire que cela correspond à la forme dans laquelle les processus de pensée sont communiqués à d'autres personnes au lieu de la forme sous laquelle ils sont subjectivement effectués. La façon dont, par exemple, un mathématicien publie une nouvelle démonstration, ou un physicien son raisonnement logique dans la fondation d'une nouvelle théorie, serait presque identique à notre conception de la reconstruction rationnelle, et la différence bien connue entre la façon dont le savant découvre ce théorème et sa façon de le présenter devant un public peut illustrer la distinction en question. J'introduirai les termes *contexte de découverte* et *contexte de justification* pour marquer cette distinction. Ensuite, nous devons dire que l'épistémologie n'est occupée qu'à construire le contexte de la justification. Mais même la façon de présenter les théories scientifiques n'est qu'une approximation de ce que nous entendons par le contexte de la justification. Même la forme écrite des expositions scientifiques ne correspond pas toujours aux exigences de la logique ou ne supprime pas les traces des motivations subjectives dont elles sont issues. Si la présentation de la théorie est soumise à un examen épistémologique minutieux et exact, le verdict est encore plus déplorable. Car, le langage scientifique, étant destiné à l'instar du langage ordinaire à des fins pratiques, contient des abréviations et tant d'inexactitudes tacitement tolérées qu'un logicien ne sera jamais pleinement satisfait de la forme des publications scientifiques. Notre comparaison, cependant, peut au moins indiquer la manière dont nous voulons voir une pensée remplacée par des opérations valides, et il peut également montrer que la reconstruction rationnelle de la connaissance appartient à la tâche descriptive de l'épistémologie. Il est lié à la connaissance factuelle de la même manière que l'exposition d'une théorie est liée à la pensée effective de son auteur. (Reichenbach, 1957, p. 6-7 – notre traduction).

Pendant la vingtaine d'années qui a suivi la publication de ce texte, la conception justificationniste a régné sans partage sur la philosophie des sciences. Elle ne sera discutée et fortement nuancée que vers les années 1960. Thomas Kuhn fut la figure de proue de cette mise en cause des thèses du philosophe allemand et ses héritiers. L'un des objectifs de Lakatos fut en fait de concilier la perspective descriptive et historique de Kuhn avec le point de vue logique et normatif de Popper. Aussi, reprend-il la valorisation kuhnienne du contexte de découverte en tentant de développer une théorie des relations de la découverte et de la justification. Dans cette optique, Lakatos invente sa théorie de la méthodologie falsificationniste des programmes de recherche que nous allons présenter maintenant.

Selon Lakatos, la science se définit par une caractéristique fondamentale : le progrès. Sa méthodologie repose sur les heuristiques, négative d'une part et positive d'autre part, qui ont pour cadre respectivement le noyau dur et la ceinture protectrice. En cas de mise à l'épreuve, l'hypothèse auxiliaire intervient pour, dirons-nous, tester le noyau dur à travers la ceinture protectrice. Ainsi, si une conjecture audacieuse prédit les faits annoncés, elle est progressive et conforte le programme de recherche. Par contre, si elle court après les faits, comme il le dit non sans ironie, ou n'arrive à les expliquer qu'après coup, alors on ne pourra considérer un tel programme de recherche que comme dégénérescent, ce qui conduit à son abandon, puis à son remplacement par un autre plus prometteur<sup>71</sup>. Ce qui définit la valeur et la qualité d'un programme de recherche pour Lakatos est d'abord et avant tout sa capacité à croître. Ce sont là les grandes lignes de ce que Ian Hacking appelle la « vision alternative et rationaliste de la science » (Hacking, 1989, p. 42) de Lakatos et que Serge Robert qualifie, reprenant son mentor, d'épistémologie « activiste révolutionniste, (...) dans une situation intermédiaire entre le révolutionnisme poppérien et le conservatisme kuhnien. » (Serge Robert, 1993, p. 183).

En outre, Lakatos considère que les théories de Popper sont passées du falsificationnisme dogmatique<sup>72</sup> qui le caractérisait avant 1920, que l'on a tenu à tort pour la thèse officielle de celui-ci, au falsificationnisme méthodologique<sup>73</sup> qu'il

---

<sup>71</sup> Lakatos dit à ce sujet : « A research programme is successful if all this leads to a progressive problemshift; unsuccessful if it leads to a degenerating problemshift. », Lakatos. 1978. *Philosophical Papers*, Vol 1, p. 48.

<sup>72</sup> Selon Lakatos, le falsificationnisme dogmatique ou « naturaliste » « admet que *toutes* les théories scientifiques sont faillibles, sans exception, mais il conserve une sorte de base empirique infaillible. Il est strictement empiriste sans être inductiviste. Selon lui, la certitude de la base empirique ne peut se transmettre aux théories. Ainsi, le falsificationnisme dogmatique est la variante la plus faible du justificationnisme. » Lakatos, *Histoire et méthodologie des sciences*, p. 7 ou *Philosophical Papers*, vol. 1, p. 12.

<sup>73</sup> Selon Lakatos : « Le tenant du falsificationnisme méthodologique se rend compte que les « techniques expérimentales » de l'homme de science impliquent des théories faillibles, à la « lumière » desquelles il interprète les faits. Malgré cela, il « applique » ces théories, les considérant dans le contexte donné, non comme des théories en cours de mise à l'épreuve, mais comme un *savoir acquis* non problématique, « que nous admettons » (fût-ce à titre provisoire) comme non



a adopté par la suite jusqu'aux alentours de 1950. C'est la période que Lakatos appelle celle du Popper 1 qui succède au premier (Popper 0) et qui développe un falsificationnisme défini comme une méthodologie où les observations sont chargées de théorie, les contre-exemples répétables tout en étant susceptibles de faire l'objet d'un consensus intersubjectif et où des stratagèmes immunisateurs sont possibles, mais peuvent être condamnés au nom du progrès scientifique (Serge Robert, 1993, p. 183). Cependant, pour le jeune collègue de Popper, depuis les années cinquante, celui-ci aurait évolué discrètement vers un Popper 2 qui aurait substitué sa version naïve du falsificationnisme méthodologique par une autre plus sophistiquée<sup>74</sup>. Ainsi, en critiquant le falsificationnisme selon Popper 1, Lakatos rejette la possibilité que des hypothèses scientifiques individuelles puissent valablement être confrontées à l'expérience. En effet, selon lui, à l'instar de Duhem, c'est un ensemble complexe et solidaire qui est toujours mis à l'épreuve. De ce fait, la science se décline, pour lui, sous forme de « programmes de recherche ». Mais, qu'est-ce qu'un programme de recherche ? Voilà ce qu'en dit son concepteur :

---

problématique pendant que nous mettons à l'épreuve la théorie. Il peut qualifier ces théories - et les énoncés dont il détermine la valeur de vérité à leur lumière - de « produits d'observation » : mais ce n'est qu'une façon de parler héritée du falsificationnisme naturaliste. Le tenant du falsificationnisme méthodologique *se sert de celles de nos théories qui ont le mieux réussi comme d'extensions de nos sens*, et il étend le domaine des théories applicables dans une mise à l'épreuve bien au-delà du domaine des théories strictement d'observation pour le falsificationniste dogmatique. », Lakatos, *Histoire et méthodologie des sciences*, p. 7 pour ce passage et de p. 19 à p. 37 pour plus de détails ou *Philosophical Papers*, vol. 1, p. 20-31.

<sup>74</sup> Voir la partie consacrée au falsificationnisme sophistiqué dans les *Philosophical Papers* (1978a, p. 31-47) et la traduction française de Luce Giard : « Dans la version naïve, est « acceptable » ou « scientifique » toute théorie que l'on peut interpréter comme expérimentalement falsifiable. Pour la version sophistiquée, une théorie n'est « acceptable » ou « scientifique » que si elle surpasse la théorie précédente (ou rivale) par son contenu empirique corroboré, c'est-à-dire seulement si elle conduit à découvrir des faits inédits. On peut analyser cette condition en deux clauses : la nouvelle théorie doit avoir plus de contenu empirique (« acceptabilité<sub>1</sub> »), et une partie de ce contenu supplémentaire doit être vérifiée (« acceptabilité<sub>2</sub> »). Par une analyse logique *a priori*, on peut reconnaître instantanément si la première clause est remplie ; pour la seconde, cela ne peut se faire qu'empiriquement et prendre un temps indéterminé.

Pour le tenant du falsificationnisme naïf, une théorie est *falsifiée* par un énoncé « d'observation » (« renforcé ») qui entre en conflit avec elle (ou qu'il décide d'interpréter ainsi). Pour le falsificationniste sophistiqué, une théorie scientifique *T* est *falsifiée* si et seulement si l'on a proposé une autre théorie *T'* dotée des caractères suivants : 1 / comparée à *T*, *T'* a un supplément de contenu empirique : c'est-à-dire qu'elle prédit des faits *inédits*, à savoir des faits improbables à la lumière de *T*, ou même interdits par *T*, 2 / *T'* explique le succès antérieur de *T*, c'est-à-dire que tout le contenu non réfuté de *T* est compris dans le contenu de *T'* (dans les limites des erreurs d'observation) ; et 3 / une certaine partie du contenu supplémentaire de *T'* est corroborée. (...) » p. 38 ou de p. 37 à p. 61 pour une bonne partie des développements consacrés à cette question par Lakatos.

J'ai parlé du problème de l'évaluation objective du développement des sciences en termes de déplacements progressifs et dégénératifs de problèmes dans des séries de théories scientifiques. Les séries les plus importantes pour le développement des sciences se caractérisent par une certaine *continuité* qui relie leurs termes, et qui provient d'un authentique programme de recherche ébauché dès le début. Ce programme se compose de règles méthodologiques sur les voies de recherche à éviter (*heuristique négative*) ou à poursuivre (*heuristique positive*).

On peut même considérer la science dans son entier comme un immense programme de recherche qui obéit à la règle heuristique suprême de Popper : « imaginer des conjectures qui aient plus de contenu empirique que les conjectures précédentes ». Des règles méthodologiques de ce genre peuvent être formulées, Popper l'a fait remarquer, sous forme de principes métaphysiques. On peut par exemple énoncer la règle *universelle* anti-conventionnaliste qui interdit les exceptions sous la forme du principe métaphysique : « La nature ne permet pas d'exception ». C'est pour cette raison que Watkins a qualifié ces règles de « métaphysique influente ». (Lakatos, 1994, p. 62).

Ainsi, tel que reformulé par Chalmers, « une hypothèse doit être falsifiable, elle est d'autant meilleure qu'elle est plus falsifiable, mais elle ne doit cependant pas être falsifiée. » (Chalmers, 2008, p. 91). Cette condition à elle seule n'étant pas suffisante, un falsificationniste sophistiqué comme Lakatos a besoin de lui adjoindre une condition supplémentaire afin de rendre compte de la nécessité pour la science de progresser. C'est pourquoi il estime qu'une hypothèse doit être plus falsifiable que celle qu'elle cherche à remplacer. De ce fait, le falsificationnisme sophistiqué déplace l'attention des mérites d'une théorie unique de la science à ceux relatifs des théories en concurrence. Du coup, contrairement au falsificationnisme naïf, celui préconisé par Lakatos assume une vision dynamique de la science. Par conséquent, plutôt que de se demander si une théorie est falsifiable, on s'interrogera davantage sur son aptitude à remplacer sa concurrente (voir Chalmers, 2008, p. 91-92).

C'est dans cette optique que le philosophe magyar soutient l'idée que l'histoire interne des falsificationnistes dramatise les conjectures audacieuses, les améliorations dont ils affirment qu'elles correspondent toujours à un accroissement de contenu, et, par-dessus tout, les expériences cruciales négatives qui triomphent ; alors que la méthodologie des programmes de recherche met l'accent sur la rivalité empirique et théorique à long terme entre programmes de recherche majeurs sur les

changements de problèmes progressifs ou dégénératifs, et sur la lente émergence de la victoire d'un programme sur l'autre. Pour lui :

Chaque reconstruction rationnelle conduit à une structure caractéristique pour la croissance rationnelle de la connaissance scientifique. Mais toutes ces reconstructions normatives peuvent avoir à être complétées par des théories empiriques externes, afin d'expliquer les facteurs non rationnels résiduels. L'histoire des sciences est toujours plus riche que sa reconstruction rationnelle. *Mais, la reconstruction rationnelle ou histoire interne est première, tandis que l'histoire externe est seulement seconde, puisque les problèmes les plus importants de l'histoire externe sont définis par l'histoire interne.* Quant à l'histoire externe, soit elle donne une explication non rationnelle du rythme, de la localisation et de l'importance des événements historiques, en tant que ceux-ci reçoivent une interprétation en termes d'histoire interne ; soit, lorsque l'histoire diffère de sa reconstruction rationnelle, elle offre une explication empirique d'une telle différence. Mais c'est la logique de la découverte scientifique qu'on adopte qui rend pleinement compte de l'aspect rationnel de la croissance scientifique. (Lakatos, 1994, p. 210).

Selon Luce Giard dans l'introduction qu'il consacre à la traduction d'une partie des *Philosophical Papers* (1978a), c'est un décalque de l'anglais qui a imposé en français la distinction reçue entre une histoire des sciences dite « internaliste », ne se souciant que des éléments « internes » à la science étudiée que sont les théories, les concepts, les procédures de démonstration et d'expérimentation, etc., et une histoire « externaliste », explorant un vaste champ d'intérêt, faisant place aux éléments « externes » à la science en question, c'est-à-dire les institutions, les financements, les carrières, l'éducation, la politique de la science, la circulation des résultats, etc.. Estimant que l'histoire externe et externaliste se tient à l'extérieur de la connaissance scientifique du fait qu'elle recourt à des sources secondaires qui ne peuvent rien apporter d'essentiel quant au contenu et à la compréhension d'une science, Lakatos avait pris fait et cause pour l'internalisme. En effet, pour lui, la question n'avait même pas à être considérée puisque l'histoire interne et internaliste est première par la nature de ses sources primaires où se communique le contenu de la science<sup>75</sup>. Comme le dit Lakatos lui-même :

Notre analyse est internaliste au sens strict ; n'y trouvent place ni l'esprit de la Renaissance si cher au cœur de Kuhn, ni le tumulte de la Réforme et de la Contre-

<sup>75</sup> Voir à ce sujet l'introduction de Luce Giard à Imre Lakatos, *Histoire et méthodologie des sciences*, p. XI.

Réforme ni l'influence des hommes d'Église, ni le moindre signe d'un effet de la naissance (réelle ou supposée) du capitalisme au XVI<sup>e</sup> siècle ni la stimulation due aux nécessités de la navigation comme se plaît à le dire Bernal. Tout notre développement est strictement interne ; sa partie progressive aurait pu avoir lieu, étant donné un génie copernicien, n'importe quand entre Aristote et Ptolémée, en n'importe quelle année après la traduction latine de *l'Almageste* en 1175, ou après celle que fit un astronome arabe au IX<sup>e</sup> siècle. L'histoire externe, *ici*, n'est pas seulement secondaire, elle est presque redondante. Il est bien évident que le système de patronage de l'astronomie, lié à l'attribution de sinécures ecclésiastiques, a joué son rôle, mais son étude n'ajoutera rien à notre compréhension de la révolution copernicienne. (Lakatos, 1994, p. 178-179).

Du coup, selon le commentaire de Giard, Lakatos dédaigne l'histoire externe et l'« externaliste » à cause du fait qu'elle manie des informations secondaires, étrangères aux textes scientifiques proprement dits. En effet, pour lui, prendre en considération les questions de l'histoire externe reviendrait à faire de l'activité scientifique une activité parmi d'autres, ce que le théoricien des « programmes de recherche » récuse énergiquement. Pour lui, la connaissance scientifique est à part et doit le rester. Elle diffère de tout autre parce qu'elle seule accroît la présence du rationnel dans notre monde. Cependant, elle doit mériter ce privilège en satisfaisant à des critères d'une grande exigence. De ce fait, il n'y a pas de compromis possible, les « normes » de rationalité doivent rester intouchables, car il vaut mieux disqualifier un travail scientifique comme pseudo-scientifique que d'accepter un affaissement des normes de spécification rationnelle. Pour Lakatos, leur observance gouverne le devenir des sciences (Lakatos, 1994, Préface de Luce Giard, p. XXIV).

Pour mieux comprendre cette posture de Lakatos, il convient de se pencher un peu plus en détail sur le « programme de recherche » et son fonctionnement. Il introduit l'idée que dorénavant, il faut une analyse des théories en tant que structure. Ainsi, à l'instar de Chalmers, nous convenons qu'un programme de recherche lakatosien est une structure qui guide la recherche future d'une façon positive d'une part et négative d'autre part. Concrètement, l'heuristique négative d'un programme de recherche consiste en des hypothèses de base sous-tendant celui-ci, c'est-à-dire son « noyau dur ». Ce dernier ne peut ni être rejeté ni être modifié sans que ne s'effondre le programme de recherche dont il garantit l'acceptabilité. Afin de le préserver de toute tentative de profanation, Lakatos l'auréole d'une ceinture protectrice



d'hypothèses auxiliaires, de conditions initiales, etc. qui le protège des falsifications. C'est ici qu'intervient l'heuristique positive qui ouvre un champ d'exercice à l'inventivité des chercheurs, complète et protège le noyau dur par des hypothèses supplémentaires visant à rendre compte de phénomènes déjà connus et à en prédire de nouveaux (Chalmers, 2008, p. 136). Tel que le recommande Lakatos :

L'unité de base à évaluer ne doit pas être une théorie isolée, ni une conjonction de théories, mais plutôt un *programme de recherche* doté d'un *noyau dur* accepté par convention (et ainsi tenu, à titre provisoire, pour irréfutable), et d'une « heuristique positive » qui définit les problèmes, esquisse la construction d'un glacis protecteur d'hypothèses auxiliaires, prévoit les anomalies et les transforme victorieusement en exemples ; tout ceci suivant un plan préconçu. L'homme de science répertorie les anomalies, mais, tant que son programme conserve son élan, il peut librement les mettre de côté. *C'est essentiellement l'heuristique de son programme, et non les anomalies, qui lui dicte le choix des problèmes.* C'est seulement lorsque la force motrice de son heuristique positive s'affaiblit qu'il peut prêter plus d'attention aux anomalies. De cette manière, la méthodologie des programmes de recherche peut expliquer le *degré élevé d'autonomie de la science théorique* : avec ses enchaînements discontinus de conjectures et de réfutations, le falsificationniste naïf en est incapable. Ce qui pour Popper, Watkins et Agassi est externe, à savoir l'influence de la métaphysique, devient ici le noyau dur interne d'un programme. (Lakatos, 1994, p. 198-199).

Vu sous cet angle, Chalmers a raison de dire que le noyau dur d'un programme est, avant tout, ce qui permet le mieux de le caractériser. Il est, en effet, formé de quelques hypothèses théoriques très générales, base à partir de laquelle le programme de recherche doit se développer. À cet égard, le noyau dur de l'astronomie copernicienne était constitué d'hypothèses selon lesquelles la Terre et les planètes gravitent autour d'un Soleil stationnaire et que la Terre tourne sur son axe en un jour, celui de la physique newtonienne est constitué des lois du mouvement et de l'attraction universelle de Newton, quant au noyau dur du matérialisme historique de Marx, c'est l'hypothèse selon laquelle le changement social s'explique par la lutte des classes, la nature des classes et les détails de la lutte étant déterminés en dernière instance par l'infrastructure économique. En outre, le noyau dur d'un programme est rendu infalsifiable par décision méthodologique de ses protagonistes. Toute inadéquation entre un programme de recherche et les données d'observation est à attribuer, non pas aux hypothèses qui

en constituent le noyau dur, mais à toute autre partie de la structure théorique. C'est l'enchevêtrement d'hypothèses qui constituent cette autre partie de la structure que Lakatos appelle la ceinture protectrice qui porte l'heuristique positive, consistant non seulement en des hypothèses auxiliaires explicites complétant le noyau dur, mais encore en des hypothèses sous-jacentes à la description des conditions initiales et en des énoncés d'observation (Chalmers, 2008, p 137).

Cette dichotomie propre au programme de recherche amène Serge Robert à parler de programme semi-ouvert et semi-fermé qu'il qualifie de « bipartition » (Robert, 2009, p. 421). Mais, pour lui, au-delà de cette distinction, la dynamique qui unit ces deux parties constitue le plus important du programme lakatosien. En effet, les chercheurs ont tendance à produire des hypothèses au niveau de la ceinture afin de protéger le noyau dès que celui-ci est confronté à un contre-exemple. Cependant, l'ajout des hypothèses de la ceinture protectrice peut avoir des conséquences prédictives s'il n'est pas simplement *ad hoc*. Car, comme le précise Chalmers :

L'exigence que, pour qu'une science progresse, ses théories soient de plus en plus falsifiables, et par suite aient un contenu de plus en plus conséquent et une valeur informative de plus en plus grande, élimine les théories conçues dans le seul but de protéger une théorie, telle que l'ajout d'un postulat supplémentaire ou un changement dans un postulat existant, n'ayant pas de conséquences testables qui n'aient déjà été des conséquences testables de la théorie non modifiée, sera appelé modification *ad hoc*. » (Chalmers, 2008, p 93).

En revanche, si l'hypothèse a des conséquences prédictives, alors comme dans le cas de l'hypothèse des isotopes, il faudrait déterminer empiriquement si cette hypothèse est corroborée ou non. Ainsi, chaque hypothèse de la ceinture doit créer un nouveau problème scientifique (*problemshift*) (Lakatos, 1978a, p. 34 et sq). Ce faisant, deux scénarii sont alors possibles. Le premier pourrait être la corroboration de l'hypothèse auxiliaire. Ce qui conférerait une plus grande prédictibilité au noyau augmenté de cette nouvelle hypothèse. Le programme devrait alors être tenu pour « progressif » (*progressive*). De l'avis de Lakatos, ce fut le cas lorsque les thèses de Prout, qui soutenait en 1815 que la masse atomique de tout élément chimique pur était un nombre entier, autrement dit un multiple de la masse atomique de

l'hydrogène, ont permis de trouver l'existence des isotopes. Le second correspondrait au cas où la nouvelle hypothèse ne serait pas corroborée. Ce qui aurait comme conséquence de ne rien changer au programme déjà existant et de ne pas accroître sa prédictibilité. La nouvelle hypothèse apparaîtrait ainsi comme étant *ipso facto ad hoc* et le programme de recherche dont elle relèverait serait alors susceptible d'être évalué comme « dégénérescent » (*degenerating*) (Lakatos, 1978a, p. 34 et *sq.*).

Comparativement au falsificationnisme de Popper et à la théorie des paradigmes de Kuhn, on peut convenir avec Robert que le concept de programme de recherche est très souple. Du coup, un même programme peut être tantôt progressif, tantôt dégénérescent. Mais, plusieurs dégénérescences consécutives favorisées par le cumul d'hypothèses *ad hoc* rendent le programme de recherche tellement décalé de la corroboration empirique qu'il finit par être falsifié comme ce fut le cas de la prolifération des épicycles dans la théorie de Ptolémée qui a fini par avoir raison du géocentrisme. Il en fut de même avec la théorie du phlogistique qui, avant Lavoisier, était l'explication scientifique admise pour rendre compte de la combustion. On considérait alors que le phlogistique était émis à partir de substances brûlées. Mais, à partir du moment où on établit que de nombreuses substances prennent du poids après la combustion, cette thèse fut menacée au point que pour surmonter cette falsification apparente, on attribua au phlogistique un poids négatif. De ce fait, même si toutes les modifications apportées à une théorie en vue de surmonter une difficulté ne sont pas nécessairement *ad hoc*, celle-ci l'était puisqu'elle ne pouvait être testée que sur des substances pesantes avant et après la combustion et ne conduisait à aucun test nouveau.

D'un autre côté, deux programmes de recherche peuvent exister ensemble à la même époque lorsqu'il n'est pas possible de considérer l'un d'eux comme étant falsifié rationnellement. Le falsificationnisme lakatosien se distingue de celui de son prédécesseur popperien par son holisme qui ne porte pas sur des hypothèses individuelles, à l'instar de la thèse développée par Karl Popper, mais se confronte

plutôt à l'expérience comme totalité. En conséquence de quoi, s'il y a falsification, c'est le programme de recherche comme totalité qui est falsifié lorsqu'il est rejeté avec son noyau dur et qu'il n'est plus possible de ne modifier que sa ceinture protectrice avec des hypothèses *ad hoc*, alors il faudra accepter de relancer la science sur une nouvelle piste. Ainsi, l'analyse de Robert dans le chapitre 15 de *Philosophie de la connaissance* (Robert (sous la dir. de R. Nadeau), 2009, p. 407–435) rend manifeste le fait que le falsificationnisme sophistiqué comprend une mesure du degré de corroboration ou de non-corroboration des conséquences prédictives des hypothèses auxiliaires et réconcilie ainsi, de manière inattendue pour les popperiens orthodoxes, quelque chose du probabilisme carnapien avec le falsificationnisme. Et, le philosophe des sciences québécois termine cette partie de son propos sur Lakatos en soulignant les dernières caractéristiques suivantes :

Enfin, ce falsificationnisme est également fondamentalement dynamique : ce qui est falsifiable, ce ne sont pas des hypothèses statiques, c'est plutôt la dynamique évolutive d'un système holiste d'hypothèses interdépendantes. Ce falsificationnisme dynamique est donc une théorie de la justification qui constitue, en même temps, une théorie de la découverte ou, plus précisément, une théorie de la justification qui n'est pas applicable aux hypothèses, mais bien plutôt à la dynamique historique des relations entre hypothèses. La logique de la justification devient, par le fait même, tout autant, une logique de la découverte. C'est en récupérant des résultats de l'épistémologie historique dans un cadre justificationniste que Lakatos développe cette logique de la découverte. La conséquence de sa position est non seulement de réconcilier la justification avec la découverte, mais également de les rendre inséparables : ce n'est que dans le développement de la découverte que la justification peut opérer et la justification est le moteur de la découverte. (Robert, 2009, p. 423).

En définitive, vue à travers les œillères théoriques de Lakatos, la science prend la forme d'un programme de recherche qui doit adopter une méthodologie inventive (*ars inveniendi*) caractérisée par une heuristique négative constituant son noyau dur et une autre dite positive formant la ceinture protectrice du noyau et la consolidant. À travers les hypothèses de la ceinture, le programme peut être mis à l'épreuve et, selon la manière dont elles sont réfutées ou corroborées. La théorie scientifique tombe en dégénérescence si l'on ne peut établir sa progressivité garante de la croissance du savoir rationnel par la confirmation de ce qui est avancé dans le cadre de cette théorie. En revanche, une science dont le caractère dégénéréscent est établi sera remplacée par une autre. Ce changement de programme de recherche est



considéré comme rationnel par Lakatos et ses héritiers, à tout le moins plus rationnel que l'approche largement distillée auprès des communautés scientifiques de l'époque. En somme :

(...) La philosophie des mathématiques de Lakatos combine certaines parties des idées de Hegel, de Pólya et de Popper dans un équilibre délicat, mais passionnant, où les insuffisances d'une approche sont atténuées ou compensées par les forces de l'autre. Le faillibilisme de Popper atténue l'autoritarisme de Hegel. L'irrationalité de la découverte est remplacée par l'idée d'une rationalité qui se déploie de façon dynamique et selon des règles bien structurées de la découverte. Le subjectivisme de Pólya est remplacé par des procédés objectivés « aliénés » de Hegel. Il est important de souligner que ce n'est pas seulement un rapiécage philosophique : comme nous le verrons dans la suite de ce texte, Lakatos a usé de l'appui de puissants instruments pour s'attaquer à un problème de la plus haute importance, - celui de la rationalité de la science et du changement de théorie qui aujourd'hui encore rechigne à toute solution. (Matteo Motterlini. 2002, p. 492).

Mais, comme nous allons le voir à présent, Serge Robert bien que se réclamant de Lakatos ne le suivra pas aveuglément sur le terrain du faillibilisme sophistiqué qui dissimule mal, selon lui, un « non-faillibilisme ». Puis, nous envisagerons les implications de leurs visions respectives sur nos thèses concernant les nanotechnosciences.

#### 4.1.2. Modèle robertien et science

Alors que pour Lakatos la science se définit comme programme de recherche par la croissance, pour Robert les mécanismes de la découverte scientifique sont dans le changement et le progrès. En fait, Robert adhère bien au falsificationnisme sophistiqué de Lakatos, mais il considère qu'il faut le sauver de la dégénérescence comme celui-ci l'avait fait auparavant pour Popper. Il remarque d'abord que le falsificationnisme sophistiqué n'est pas un véritable falsificationnisme au sens popperien. En effet, pour Robert il ne permet pas vraiment de déterminer qu'un programme de recherche est objectivement faux puisque la thèse lakatosienne selon laquelle un programme n'est falsifié que s'il existe un meilleur programme concurrent montre bien qu'il ne s'agit pas d'une véritable falsification. C'est pourquoi il est plus exact de parler d'un abandon, que l'on peut expliquer en

soutenant que la communauté scientifique juge que les modifications à faire pour tenter de rendre à nouveau le programme progressif n'en valent pas la peine, parce qu'elles risquent, par exemple, d'être trop nombreuses, ou trop complexes, ou trop incertaines quant à leurs résultats. Cela conforte l'analyse robertienne selon laquelle il n'existe pas de falsificationnisme lakatosien en dépit de ce qu'en dit Lakatos (Robert, 1993, p. 188). En fait :

Le falsificationnisme sophistiqué est tel qu'un programme de recherche n'est considéré falsifié que lorsque ses adeptes l'ont abandonné. Il s'agit donc d'un abandon de fait et non d'une véritable falsification de droit. Rien ne permet en effet de considérer qu'un programme est objectivement faux simplement parce qu'on l'a abandonné. L'assomption de la thèse Duhem-Quine, par Lakatos, fait en sorte qu'il est toujours possible de reprendre un programme abandonné et de produire les hypothèses auxiliaires qui l'immuniseraient à nouveau contre les contre-exemples et qui pourraient même, qui sait !, accroître à nouveau sa prédictivité. (Robert, 1993, p. 187).

Ainsi, le falsificationnisme de Lakatos abandonne les théories plus qu'il ne les falsifie, ce qui fait dire à Robert qu'il n'y a point de falsificationnisme lakatosien (Robert, 1993, p. 187-188). En outre, le philosophe québécois décèle une ambiguïté dans la conception du noyau dur chez Lakatos. Il note que l'analyse du holisme de son mentor permet de mettre en évidence, d'une part le fait que le noyau dur apparaît comme formé d'hypothèses scientifiques ayant un contenu empirique suffisamment important pour rencontrer des contre-exemples empiriques et exiger des hypothèses auxiliaires pour neutraliser ces contre-exemples ; d'autre part, le noyau dur peut aussi être considéré comme un creuset de thèses métaphysiques, distinctes, de par leur contenu, des propositions de la ceinture protectrice, ce qui les rendraient en tant que tel peu testables ou pas du tout. Dans le premier cas de figure, on comprend mal ce qui distingue les thèses du noyau dur des thèses scientifiques que l'on accepte de remettre en question et pourquoi on résisterait davantage à questionner les thèses de ce noyau dur. Dans le second, si tel est le cas, alors on ne pourrait plus comprendre pourquoi il faut produire des hypothèses auxiliaires pour sauver celles-ci de la réfutation (Robert, 1993, p. 189-190). Robert pense que cette ambiguïté est corrélée à l'argumentation de Lakatos qui se réfère à la fois à l'histoire des sciences, où il constate de fortes résistances à remettre certaines thèses en question

comparativement à d'autres thèses auxquelles on tient moins, et à la philosophie des sciences, où les thèses sont distinguées en différents types, selon la nature de leur contenu et leur rapport à l'empiricité. L'écueil ainsi dévoilé par le théoricien du correctionnisme l'amène à se proposer de le dépasser de la seule façon qui lui semble acceptable, en s'appuyant sur le holisme quinien et en considérant la science comme un système total où de la périphérie au centre les hypothèses ont un contenu de moins en moins empirique et de plus en plus théorique, sans pour autant perdre totalement de leur empiricité. Ainsi :

Les thèses du noyau dur peuvent alors être considérées comme n'ayant pas un contenu historique et un contenu philosophique distincts : le caractère plus théorique et moins empirique des thèses du noyau dur fait qu'on refuse historiquement de les modifier (parce que cela aurait trop d'effets transformateurs sur le système total) et qu'en même temps, on les considère d'un point de vue philosophique comme métaphysiques. On lève ainsi l'ambiguïté lakatosienne en développant la portée de son holisme. Le caractère plus métaphysique et le caractère moins modifiable des thèses du noyau dur sont des propriétés inséparables, dépendantes de leur caractère plus théorique et moins empirique. (Robert, 1993, p. 190).

Bien que Lakatos reste falsificationniste, il n'en sera pas moins l'inspirateur du renchérissement de la critique robertienne du falsificationnisme poppérien. En effet, Robert admet que si l'on rassemble certains des résultats importants auxquels Lakatos est parvenu, on arrive à certaines de ses positions anti-poppériennes. Sous l'influence combinée de Kuhn et du conventionnalisme, Lakatos reconnut la possibilité de sauver une théorie de la falsification par des hypothèses auxiliaires et découvrit que la formulation de ces hypothèses était un mécanisme essentiel de la découverte scientifique et de la croissance de la scientificité des programmes de recherche. Aussi, en s'intéressant de plus près au conventionnalisme, il se rendit compte du lien profond existant entre les contextes de découverte et de justification. En vérité, juger de la valeur objective de la science, c'est aussi évaluer sa capacité à réagir aux contre-exemples. Du coup, la découverte scientifique apparaît comme une réaction prédictive à des contre-exemples alors que la justification se focalise sur la réalisation ou la non-réalisation de ces prédictions. Ce constat fait dire à Robert que la théorie lakatosienne implique que la justification porte sur la valeur prédictive des stratégies de découverte, alors que la découverte est élaborée pour

contrer les prédictions déçues (Robert, 1993, p. 188). Considérant tout ceci, il estime que l'on peut conclure que la connaissance est fondamentalement une activité d'anticipation de l'expérience par la représentation et une interminable quête de la déduction du fonctionnement du monde à partir de corrections successives d'hypothèses générales. Ce qui lui fait dire que la pensée de Lakatos contient une thèse de l'interaction entre les contextes de découverte et de justification, refusant ainsi, comme il le fera lui-même à sa suite, l'objectivisme radical de Popper et permettant la réconciliation avec l'inductivisme et le psychologisme carnapiens. Ce qui conforte l'auteur des *Mécanismes de la découverte scientifique* dans l'idée qu'il fait bien de fonder son opposition au falsificationnisme poppérien sur un inductivisme, un psychologisme, un conventionnalisme, un holisme et une interaction entre les contextes de découverte et de justification (Robert, 1993, p. 188).

De son interprétation de la théorie lakatosienne, Robert construit sa méthodologie du travail scientifique qu'il appelle correctionnisme. Il remarque que ce qui découle de la philosophie des sciences du Magyar est que les programmes de recherche ne sont pas vraiment objectivement faux ou vrais, mais plus ou moins fiables pour le sujet connaissant, en vertu de leur valeur prédictive plus ou moins corroborée. Robert identifie alors ce qu'il considère comme une position implicite en matière de justification chez Lakatos et qu'il situe entre le falsificationnisme poppérien et le probabilisme carnapien. Tout en prenant ses distances d'avec le falsificationnisme de Popper et le probabilisme de Carnap, Lakatos retient du premier que notre rencontre objective avec le monde empirique se fait par la résistance de ce dernier à nos anticipations ; et du second il reprend l'idée que ce n'est que de façon comparative que l'on peut juger de la valeur objective de nos théories, selon le degré comparé de corroboration de leurs prédictions. En conséquence de cette situation implicite chez Lakatos, Robert tire la théorie explicite de la justification qu'il va nommer « correctionnisme » (Robert, 1993, p. 189). Cependant, comment Robert passe-t-il des thèses lakatosiennes au rationalisme interactionniste et au correctionnisme qu'il préconise ?



Il prétend que « pour passer des thèses lakatosiennes au rationalisme interactionniste et au correctionnisme, il a fallu non seulement découvrir le non-falsificationnisme implicite de Lakatos, mais aussi identifier son holisme, critiquer son concept de noyau dur et penser les relations du noyau et de la ceinture de façon interactionniste. » (Robert, 1993, p. 189). Examinons de plus près cette théorie de Serge Robert qui se prenant au mot procède à l'application de sa méthode correctionniste à la méthodologie des programmes de recherche qui l'inspire. Dans cette optique, permettons-lui de préciser le projet qui est le sien :

Faisant mien le slogan de Lakatos, je considère que la philosophie des sciences sans l'histoire des sciences est vide et que l'histoire des sciences sans la philosophie des sciences est aveugle. Une théorie philosophique de la justification non basée sur l'étude empirique de ce que l'histoire des sciences a été est un ensemble vide de prescriptions peut-être jamais réalisées. De même, la narration descriptive du développement historique des sciences est aveugle quand elle ne voit pas que chaque description n'est rendue possible qu'à travers un point de vue sélectif obtenu à partir d'une conception normative de la distinction entre de la science authentique et de la pseudo-science (*sic*).

Ainsi, au-delà de la distance traditionnelle entre la philosophie des sciences et l'histoire des sciences, et suivant la perspective lakatosienne, je propose une théorie de la science qui fait une démarcation entre la science et la pseudo-science et qui tient compte de l'histoire des sciences. Ici, l'histoire des sciences ne doit pas être comprise comme une narration empirique de la succession des événements scientifiques, mais comme étant plutôt une reconstruction rationnelle du développement des théories scientifiques. (Robert, 1993, p. 7).

Dans son entreprise de reconstruction rationnelle du développement des théories scientifiques, Robert entreprend de marcher sur les traces de Lakatos sans hésiter à le reprendre chaque fois qu'il repère un défaut ou une inconsistance susceptible de porter préjudice au programme de recherche en le falsifiant temporairement ou durablement. C'est ainsi qu'il compte, à la manière correctionniste, sauver le programme lakatosien comme celui-ci l'avait fait antérieurement pour le falsificationnisme popperien, afin disait-il de le préserver de la dégénérescence. Au fond, la thèse de Robert est *mutatis mutandis* une sorte de réplique symétrique de celle de Lakatos. En effet, on peut substituer le rationalisme interactionniste au programme de recherche et le correctionnisme au falsificationnisme sophistiqué. Mais, qu'est-ce que le rationalisme interactionniste ?

#### 4.1.2.1. Rationalisme interactionniste

On peut dire d'emblée que l'interactionnisme ou le rationalisme critique que nous allons tenter d'exposer ici, dans le sens où Serge Robert l'entend, comprend « une théorie abductionniste et correctionniste de la découverte et une théorie correctionniste de la justification. » (Robert, 1993, p. 218). Le rationalisme critique de Robert s'inscrit dans le sillage lointain d'Aristote et à proximité de celui de Carnap et de Popper. L'origine aristotélicienne de ce rationalisme tient à sa théorie de la vérité-correspondance qui préfigure son rationalisme dogmatique qui définissait la connaissance vraie comme une correspondance entre la connaissance et ses objets. Cependant, Aristote mesure bien la difficulté d'une telle entreprise compte-tenu du fait que le savoir humain à l'instar de toute expérience humaine est fatalement imprégné de contingence et d'imperfection. Plus près de nous, Robert attribue à Kant, par sa critique de la raison pure qui établit l'impossibilité de connaître les choses en soi, le statut de précurseur de son propre rationalisme critique qu'il définit comme « soutenant que la relation cognitive du sujet connaissant aux objets est une interaction dynamique dans laquelle la vérité est, plutôt qu'une correspondance accessible, une limite inaccessible à laquelle nous tendons à travers un processus d'adaptation infinie à notre environnement. » (Robert, 1993, p. 5). Cette idée fondamentale dans l'approche interactionniste, Robert reconnaît qu'elle s'apparente à celle de quelques-uns de ses prédécesseurs, à l'instar de Carnap avec sa notion de progrès par accroissement du degré de probabilité de vérité et Popper avec sa théorie du progrès par augmentation du degré de vérisimilitude. Ainsi, *Les mécanismes de la découverte scientifique*, dont le titre initial était *Découverte, justification et cognition : une épistémologie rationaliste interactionniste*, s'inscrit dans la tradition rationaliste critique en philosophie des sciences. Pour Robert, le vérificationnisme probabiliste de Carnap ainsi que le falsificationnisme de Popper se situent plus ou moins à mi-chemin entre l'aristotélisme et son criticisme, qu'il préfère désigner par « rationalisme interactionniste ». Par conséquent, le rationalisme interactionniste de Robert est un rationalisme critique ou son rationalisme critique est un interactionnisme qui vise à

analyser les interactions cognitives entre les humains et leur environnement (Robert, 1993, p. 6-10). Au fond, Robert pense que compte tenu du fait que depuis Aristote, la philosophie occidentale peut s'interpréter comme un long et sinueux débat entre rationalisme, dogmatisme et anarchisme, les rationalistes ont dû apprendre la modération en se dotant d'une philosophie mesurée à l'abri de toute forme d'extrémisme. Ainsi, plus l'anarchisme épistémologique s'est acharné sur la philosophie rationaliste par son questionnement déstabilisant, plus le rationalisme s'est tourné vers le criticisme que Robert et certains de ses prédécesseurs ont adopté chacun à sa manière.

Lors du *Séminaire sur la représentation* du mois de février 1992 à l'initiative du Centre Interdisciplinaire de la Recherche sur l'Apprentissage et le Développement en Éducation (CIRADE) Robert présenta un article intitulé « Abduction, correction et apprentissage » et publié dans le numéro 69 de novembre de la même année sous l'égide de l'organisme susnommé. À cette occasion, il exposa son rationalisme interactionniste comme « une théorie interactionniste de la connaissance humaine ». Cette théorie se propose de suggérer des pistes de développement à la science. Les principaux résultats auxquels ont abouti les travaux du logicien de l'UQÀM lui permettent de présenter une philosophie très élaborée basée sur une approche cognitiviste de nos interactions avec notre environnement. Selon ce qu'il en dit dans son article, sa théorie de la connaissance commence dans la perception qu'il conçoit comme une expérience empirique se manifestant par une rencontre de notre expérience physique et de notre expérience psychologique. En fait, il définit quatre niveaux épistémiques dont la perception constitue l'ordre zéro, la description l'ordre un, l'explication et/ou la prédiction l'ordre deux et la justification ou le niveau métascientifique l'ordre trois. Le philosophe des sciences pense ainsi mettre en place une approche de la perception et de la signification qui permette de mieux saisir comment l'observation, le langage observationnel et le langage théorique sont distincts et agissent de façon déterminée les uns sur les autres. Ainsi, « nous devons (...) jouer sur plusieurs ordres épistémiques, ou intensionnels (descriptifs,

explicatifs et justificatifs) pour connaître le seul ordre épistémique, ou extensionnel, de notre expérience empirique. » (Robert, 1993, p. 94).

Dans ce contexte, la perception, en tant que construction reposant sur un donné sensoriel, est abductive du fait qu'elle « sélectionne des différences sensorielles de façon à nous faire percevoir des objets, elle induit à partir de ressemblances sensorielles pour nous faire percevoir des propriétés et des relations sur les objets et, à partir de là, elle déduit de façon anticipative des événements empiriques, comme étant des liens entre des objets et des propriétés ou relations perceptibles. » (Robert, 1992, p. 9). Cependant, les éléments de notre environnement que nous retenons par nos opérations de sélection dépendent de nos intérêts pragmatiques de connaissance tout comme le contenu de nos inductions est relatif aux régularités qui sont spécifiques à notre environnement. Puis, intervient l'imagination de façon créative sur nos résultats perceptifs en les réorganisant, de manière à produire des entités imaginaires telles que les objets, les propriétés, les relations, ou des événements imaginaires. Ensuite, Robert recourt au premier ordre épistémique<sup>76</sup> que nous avons présenté comme l'ordre descriptif et qui correspond à la représentation verbale qui rend possible la présentation des résultats de la

---

<sup>76</sup> Voir le chapitre 2 de l'ouvrage, *Les mécanismes de la découverte scientifique* dont voici un extrait qui explique de façon assez claire les concepts engagés dans cette partie de la réflexion de Robert : « Bien qu'ils soient distincts, les ordres épistémiques du langage se chevauchent et interagissent, contrairement aux ordres logiques. Étant donné que les individus sont construits comme des classes à extension singulière, de même que les propriétés et les relations primitives sont construites comme des classes à intension singulière, on voit tout de suite que le deuxième ordre inductif est produit par induction à partir du premier ordre, de la même façon que le premier ordre est élaboré par induction perceptive à partir de la sensation. Le deuxième ordre est donc une construction de généralisation à partir du premier ordre. Quant au rapport inverse du deuxième ordre au premier, il est un rapport déductif de l'universel vers le particulier. Comme nous allons le voir maintenant, le rapport du deuxième ordre au premier est double et donne lieu à deux sous-ordres au sein du discours scientifique. D'une part, l'induction du premier ordre au second peut se faire par l'universalisation intensionnelle, ce qui donne naissance à des définitions (et descriptions définies), c'est-à-dire que l'on généralise à l'ensemble des mondes possibles ce qui est observable sur une ou des entités du monde empirique. D'autre part, l'induction du premier ordre au second peut se faire aussi par universalisation extensionnelle, et produire ainsi des hypothèses causales, ce qui correspond à généraliser ce qui est observable sur une ou des entités de notre monde empirique à l'ensemble des entités qui leur sont semblables dans ce même monde. Chacun de ces deux sous-ordres exerce un effet déductif spécifique sur le langage observationnel : les définitions (et descriptions définies) rendent le discours descriptif organisé et chargé de théorie, comme les hypothèses causales procurent à ce discours descriptif des explications et des prédictions en terme de mécanismes. » p. 95.



perception et de l'imagination dans le langage verbal. Ce dernier est obtenu par abduction, autrement dit, par sélection, induction, déduction et, parfois, réorganisation imaginaire. L'induction verbale permet ainsi de passer d'un niveau de langage inférieur à un niveau supérieur. La déduction, en revanche, nous fait passer en sens inverse, d'un niveau supérieur à un niveau inférieur :

Ainsi, la connaissance humaine se joue principalement sur trois niveaux de langage : un premier niveau dont la fonction est descriptive, un deuxième niveau, qui est explicatif et, enfin, un troisième niveau, lequel est justificatif (ou apte à expliquer des explications). Alors que le niveau explicatif est celui où, à travers des définitions et des hypothèses causales, on retrouve le discours scientifique, le niveau justificatif est celui des fondements métascientifiques de la connaissance, comme ce qu'on retrouve dans les lois logiques ou mathématiques, dans les hypothèses de la physique théorique ou dans les théories épistémologiques. (Robert, 1992, p. 10).

Selon cette conception de la rationalité, l'évolution rationnelle de la connaissance consiste dans l'élimination de problèmes d'inconsistance dans le système total de la connaissance. Elle conçoit plusieurs types d'inconsistances dont certaines sont horizontales ou internes à un même niveau de langage, d'autres sont verticales ou entre deux niveaux de langage successifs, comme le descriptif et l'explicatif, ou l'explicatif et le justificatif. Dans une telle perspective, le progrès cognitif consiste en l'élimination des inconsistances. Et, les inconsistances verticales peuvent être éliminées par des opérations de correction, qui sont soit des exclusions extensionnelles, c'est-à-dire des ajustements par le niveau discursif du bas, ou des remaniements intensionnels qui correspondent aux ajustements par le niveau discursif du haut. On peut donc dire avec Robert que selon sa théorie rationaliste interactionniste, la connaissance est une activité de représentation psychologique de notre expérience physique par la médiation de notre expérience empirique, par le truchement d'opérations abductives telles que la sélection, l'induction, la réorganisation imaginaire et la déduction, mais aussi d'opérations correctives comme l'exclusion extensionnelle et le remaniement intensionnel (Robert, 1992, p. 10). Cependant, en quoi consiste la correction des inconsistances dont parle Robert ?

En réalité, le correctionnisme, répétons-le, est un affaiblissement du falsificationnisme sophistiqué de Lakatos, qui récupère le probabilisme carnapien contre lequel le falsificationnisme poppérien s'était défini (Robert, 1993, p. 206). Il établit un critère de démarcation entre science et non-science pour le rationalisme interactionniste fondé sur la capacité du discours scientifique à réagir aux contre-exemples par des modifications. En effet, la science tente de résoudre ses problèmes et de se corriger. Elle prend le risque d'essayer d'accroître son objectivité ou de la diminuer, et ainsi, de progresser ou de dégénérer. Le discours non scientifique, en revanche, ne réagit jamais de manière autocritique aux contre-exemples opposés à ses prédictions et ne court ainsi aucun risque de progresser ou de dégénérer par ses modifications, même s'il peut avoir des conséquences prédictives. Dans le fond, Robert observe que tout discours qui tente d'exprimer une connaissance est généré par abduction (sélection, induction, réorganisation imaginaire et déduction). Dans cette optique, le discours scientifique est modifié par des stratégies de correction horizontale et de correction verticale (exclusion extensionnelle et remaniement intensionnel). Mais le discours de connaissances non scientifique au contraire limite l'interaction entre niveaux discursifs à l'abduction et parfois aux corrections horizontales, sans avoir recours aux corrections verticales. En procédant de la sorte, il fait fi des problèmes cognitifs empiriques du système de connaissance. D'une certaine façon, le correctionnisme est le pendant interactionniste du falsificationnisme des programmes de recherche. Pour son concepteur :

En fait, du point de vue du rationalisme interactionniste, le discours épistémologique, en tant qu'élaboration de conditions transcendantales de la connaissance, traite ces conditions comme suffisantes et non nécessaires pour le discours scientifique (ou explicatif). Le discours épistémologique est ainsi, comme tout discours justificatif, un ensemble d'hypothèses corrigibles pour rendre compte de la science, comme la science est, à son tour, faite d'hypothèses corrigibles pour rendre compte du langage observationnel et de l'observation. Après avoir découvert l'interaction du langage observationnel et du langage scientifique, on peut concevoir un troisième ordre discursif comme étant un langage métascientifique, qui prend le langage scientifique pour objet et entretient avec lui le même rapport que le langage scientifique a avec le langage observationnel. (...). Si le discours épistémologique soutient des hypothèses comme conditions suffisantes de la connaissance, et non plus comme conditions nécessaires, la catégorie du nécessaire ne s'applique plus au discours épistémologique, comme c'était le cas chez Kant, et on peut commencer à parler d'une science corrigible du transcendantal. (Robert, 1993, p. 117).

D'un point de vue interactionniste, le langage observationnel et le langage théorique n'apparaissent plus ni indépendants, ni réductibles l'un à l'autre par des règles de correspondance où l'observation et le langage observationnel sont chargés de théorie, et où la science forme un système holiste de génération et de validation d'énoncés descriptifs, explicatifs et justificatifs interdépendants les uns des autres. De plus, l'observation et le langage observationnel ne peuvent plus être pris pour des tribunaux neutres qui permettraient de faire la somme des corroborations et des non-corroborations des hypothèses scientifiques, y compris celles qui sont théoriques (Robert, 1993, p. 162).

De façon plus élargie, si l'on veut parler d'un programme de recherche épistémologique rationaliste critique, dont Robert reconnaît la pertinence, la théorie lakatosienne pré-interactionniste et son rationalisme interactionniste apparaissent alors comme deux remaniements successifs du programme falsificationniste lancé antérieurement par Popper (Robert, 1993, p. 209). En outre, rappelons aussi que pour passer des thèses lakatosiennes au rationalisme interactionniste et au correctionnisme, il a fallu que Serge Robert démasque non seulement le non-falsificationnisme de Lakatos, mais encore qu'il identifie le holisme de celui-ci, critique son concept de noyau dur et repense les relations du noyau et de la ceinture de façon interactionniste (Robert, 1993, p. 189). Robert remarque que le holisme lakatosien révèle une certaine ambiguïté dans le concept de noyau dur. De son analyse il ressort, d'une part que le noyau dur paraît formé d'hypothèses scientifiques ayant un contenu empirique suffisamment important pour être confrontées à des contre-exemples empiriques et risquer des hypothèses auxiliaires afin de les neutraliser. Si tel est le cas, le philosophe se demande alors ce qui distingue les thèses du noyau dur des thèses scientifiques que l'on accepte de remettre en question et pourquoi on résisterait davantage à questionner les thèses de ce noyau dur. D'autre part, considérant le fait que le noyau dur peut aussi être considéré comme un ensemble de thèses métaphysiques qui se distingue, par son déficit ou son absence de testabilité outre son contenu, des thèses de la ceinture

protectrice, Robert s'interroge sur la nécessité de produire des hypothèses auxiliaires pour les sauver de la réfutation. Le père du correctionnisme attribue cette inconséquence dans la théorie du Magyar au fait que l'argumentation de Lakatos se réfère à la fois à l'histoire des sciences et à la philosophie des sciences. Selon son analyse :

Cette ambiguïté m'apparaît basée sur le fait que l'argumentation de Lakatos se réfère à la fois à l'histoire des sciences, où il constate de fortes résistances à remettre certaines thèses en question comparativement à d'autres thèses auxquelles on tient moins, et à la philosophie des sciences, où les thèses sont distinguées en différents types, selon la nature de leur contenu et leur rapport à l'empiricité. La seule façon acceptable selon moi de lever cette ambiguïté est de s'appuyer sur le holisme quinién et de considérer la science comme un système total, où, de la périphérie au centre, les hypothèses ont un contenu de moins en moins empirique et de plus en plus théorique, sans pour autant être dépourvues totalement d'empiricité. Les thèses du noyau dur peuvent alors être considérées comme n'ayant pas un contenu historique et un contenu philosophique distincts : le caractère plus théorique et moins empirique des thèses du noyau dur fait qu'on refuse historiquement de les modifier (parce que cela aurait trop d'effets transformateurs sur le système total) et qu'en même temps, on les considère d'un point de vue philosophique comme métaphysiques. On lève ainsi l'ambiguïté lakatosienne en développant la portée de son holisme. Le caractère plus métaphysique et le caractère moins modifiable des thèses du noyau dur sont des propriétés inséparables, dépendantes de leur caractère plus théorique et moins empirique. (Robert, 1993, p. 190).

La thèse Duhem-Quine que nous avons vue dans notre précédent sous-chapitre a conduit Duhem au simplicisme qui postule que face à deux théories concurrentes, on ne peut que choisir la plus simple, c'est-à-dire celle qui recourt au plus petit nombre d'hypothèses *ad hoc* pour sauver les phénomènes. Par contre, elle a amené Quine à son holisme épistémologique qui stipule qu'aucune hypothèse scientifique ne peut être testée individuellement puisqu'elle n'est jamais confrontée à l'expérience que comme totalité. Ce qui signifie que les hypothèses de la physique subissent collectivement le test expérimental. Le holisme lakatosien quant à lui se manifeste dans sa manière de faire dépendre la survie du noyau dur au progrès ou à la dégénérescence des hypothèses de la ceinture protectrice. En effet, si nous suivons Robert dans son analyse, il apparaît qu'« en reconnaissant que les contre-exemples aux théories scientifiques peuvent toujours être éliminés par des hypothèses auxiliaires, Lakatos aboutit à un certain holisme, où le programme de recherche est confronté comme totalité à l'expérience. » (Robert, 1993, p. 189).



D'un autre côté, en affectant les énoncés empiriques d'une charge théorique certaine, Lakatos affaiblit la démarcation naguère radicale entre ce qui relève du théorique et ce qui revient à l'empirique. De ce fait, il admet la possibilité que des énoncés hautement théoriques puissent avoir une part de contenu empirique qui les rend empiriquement « éprouvables ». C'est ce qui lui permet de concevoir des programmes de recherche scientifiques tant en mathématiques qu'en épistémologie. Ce constat fait dire à Robert que le programme de recherche, qu'il soit mathématique ou épistémologique, est un système total composé d'un noyau dur non testable empiriquement ainsi que d'une ceinture protectrice destinée à être confrontée aux expériences et susceptible de subir des modifications fréquentes en fonction de la portée des contre-exemples rencontrés. À son avis, « c'est cette part de holisme qui, dès le travail de Lakatos sur les mathématiques, avait (...) instauré la rupture entre Lakatos et Popper. » (Robert, 1993, p. 189). C'est de la conscience des implications de ce holisme que s'origine le rationalisme interactionniste dont il est question ici tire son origine et sa non-prise en compte a empêché Lakatos de sortir du giron falsificationniste popperien. Mais c'est l'opposition trop rigide entre noyau dur et ceinture protectrice qui pousse Robert à proposer un affaiblissement du système lakatosien. Ainsi, considérant que le noyau n'est pas aussi dur que cela et que la ceinture n'est pas aussi protectrice qu'on ne le prétendait au vu de l'histoire des sciences, le correctionniste canadien en arrive à soutenir l'idée qu'au fond l'attachement plus grand aux thèses du noyau qu'à celles de la ceinture protectrice n'est qu'une question de degré (Robert, 1993, p. 190). Voici comment, de son propre aveu, il en arrive à son holisme à double entrée :

C'est donc en explicitant la portée holiste antipopperienne de l'œuvre de Lakatos et en la rapprochant du holisme de Quine que j'ai été amené au rationalisme interactionniste. Comme on l'a vu précédemment, j'ai dû également proposer des modifications au holisme quinién, en remettant en question son empirisme trop radical, pour arriver à un holisme à deux entrées, l'une étant empirique et sélectivo-inductive, à partir de la périphérie du système de la science, l'autre étant théorique et déductive, à partir du centre du système. (Robert, 1993, p. 191).

Ainsi Robert propose de reformuler son holisme à trois niveaux du langage cognitif (niveau zéro de l'observation, premier ordre discursif-descriptif et deuxième ordre

discursif-explicatif/prédictif) et deux entrées. D'abord, il convient de préciser que chaque niveau de langage inférieur, relativement au niveau qui lui est immédiatement supérieur, est plus empirique, moins théorique, plus donné, moins construit, et l'ensemble des niveaux inférieurs jouent le rôle de ceinture relativement au niveau supérieur ultime que constitue le noyau. Cependant Robert nous met en garde contre toute velléité de figer ces différents niveaux. Car, pour lui, ces rôles de noyau et de ceinture ne doivent pas être interprétés dans le cadre d'une opposition tranchée, mais plutôt comme une simple différence de degré. Ce qui implique, conformément aux enseignements de l'histoire des sciences, que devant une inconsistance entre deux niveaux de langage contigus (un problème scientifique vertical), l'on modifie plus promptement le niveau inférieur que le niveau supérieur. Cela semble tenir au fait que la relation des niveaux supérieurs du langage cognitif aux niveaux inférieurs est de nature déductive et que plus le niveau auquel on apporte une modification est élevé, plus la portée des transformations qui résultent du système total de la science est conséquente. C'est pourquoi, pour Robert, modifier une loi logique ou mathématique, une équation physique ou un postulat épistémologique, a davantage d'impact sur l'histoire des sciences qu'un changement de niveau explicatif au sein d'une définition ou d'une hypothèse causale (Robert, 1993, p. 191). En résumé :

(...) le rationalisme interactionniste est une théorie épistémologique qui s'appuie sur les postulats ontologiques suivants : 1) il existe un monde physique minimalement capable de nous procurer des sensations de ressemblance et de différence (physicalisme minimal) et des agents cognitifs, à savoir, perceptifs, imaginatifs et représentatifs, qui émergent du monde physique (matérialisme émergentiste) ; 2) pour bien connaître le fonctionnement de la connaissance de ces agents, il faut postuler qu'ils ont des états mentaux, irréductibles à ce que nous savons jusqu'à maintenant des états physiques (mentalisme méthodologiquement faible), et que cependant ces états mentaux ne semblent pas pouvoir exister sans support matériel, comme le cerveau (mentalisme ontologiquement faible) ; 3) les agents cognitifs n'ont un accès cognitif au monde physique que par la médiation incontournable de l'expérience empirique (*sic*), rencontre indissociable d'une expérience physique et d'une expérience mentale ; 4) les agents cognitifs doivent, pour connaître leur environnement, le considérer comme étant fait d'entités distinctes (essentialisme méthodologique) et reliées causalement (causalisme méthodologique) ; 5) en se représentant les événements à travers des classifications d'entités et des chaînes causales, la connaissance produit des explications et des prédictions d'événements qui s'inscrivent dans une lutte pour la survie. (Robert, 1993, p. 253).

Pour Robert, le rationalisme interactionniste ainsi présenté est une théorie correctionniste sur le plan de la justification. Car, ce qui distingue une théorie scientifique d'une théorie non scientifique, ce sont ses corrections verticales pour tenter de résoudre des problèmes relatifs aux relations du théorique et de l'empirique. Dans cette perspective robertienne, une entreprise scientifique n'a de valeur objective comparable à ses concurrentes que si les quatre conditions suivantes sont respectées : d'abord, les deux entreprises doivent avoir le même niveau de langage ; puis elles s'intéressent au même genre de problèmes ; ensuite elles ont en commun plusieurs présupposés de niveau supérieur ; et enfin elles sont des étapes successives ou contemporaines d'une même dynamique corrective du système de la science. Il en découle qu'une entreprise scientifique n'est alors ni vraie ni fausse, ni vérifiable, ni falsifiable, mais cela ne l'empêche pas d'avoir une valeur objective puisqu'elle est en « devenir-vrai », en « devenir-neutre » ou en « devenir-faux » relativement à une entreprise concurrente, selon qu'elle réussit à diminuer, maintenir ou augmenter le nombre de problèmes rencontrés par sa rivale. En effet, une entreprise scientifique en « devenir-vrai » est confrontée à de moins en moins de « problèmes verticaux et réalise ainsi un progrès empirique, soit par un allongement d'une chaîne causale, lors d'une restriction extensionnelle, soit par la découverte d'une nouvelle classe d'entités, lors d'un remaniement intensionnel. » (Robert, 1993, p. 252). En plus, la part de donné dans la perception paraît suffisante à Robert pour imprégner le système de la science et pour permettre de conclure qu'une correction qui élimine une inconsistance est une réponse du tribunal de la nature qui doit être interprétée comme favorable à cette correction et défavorable à son absence. Au fond, que faut-il entendre par « correction » ?

#### 4.1.2.2. Le correctionnisme

Robert avoue que son « rationalisme interactionniste s'est (...) développé en bonne partie en réaction contre la philosophie poppérienne, mais en retenant quelque chose qui s'apparente au falsificationnisme en ce qui concerne la confrontation des idées au monde empirique, et que j'appellerai le « correctionnisme ». » (Robert,

1993, p. 170). Il reconnaît, d'une part que la théorie poppérienne de la falsifiabilité est logiquement satisfaisante en ce sens que c'est dans la rencontre de contre-exemples qu'une théorie scientifique se confronte objectivement à l'expérience empirique, mais la conception poppérienne de l'objectivité scientifique est trop forte. D'où l'idée qu'il faut affaiblir la falsifiabilité originelle en restaurant la place du sujet connaissant. D'autre part, le philosophe québécois admet que la théorie carnapienne de la probabilité respecte la valeur du sujet dans la connaissance, mais qu'elle néglige, par contre, la part de construit et manque la part d'objectivité qu'on trouve dans la perception et dans la théorie scientifique. Ce qui implique pour Robert la nécessité de la mise en question du probabilisme avec en ligne de mire une perspective plus constructiviste et plus objectiviste. Ainsi, affirme le théoricien du rationalisme interactionniste, « par opposition au probabilisme et au falsificationnisme, la théorie de la démarcation qui résultera de ma démarche sera ce que j'appellerai le « correctionnisme ». » (Robert, 1993, p. 174). Il décrit ci-après le processus par lequel son approche devrait s'imposer :

Un remaniement d'une théorie épistémologique pour tenir compte des théories explicatives qui entrent en contradiction avec elle est une modification de ses critères de scientificité, lorsque la démarcation qu'ils établissent entre science et non-science est inadéquate. C'est ce que Lakatos fait en proposant de corriger le falsificationnisme poppérien par le falsificationnisme sophistiqué, pour tenir compte des travaux de Kuhn et de la thèse Duhem-Quine. C'est aussi le sens de ma présente démarche, qui va suggérer de remplacer le falsificationnisme sophistiqué par le correctionnisme. Lors de tels remaniements épistémologiques, il se produit un changement de problématique : si on change de critères de scientificité, on doit montrer que les nouveaux critères sont mieux en mesure de prédire les décisions de la communauté scientifique en matière de scientificité des théories qu'elle rencontre et qu'elle juge. Le critère du progrès est alors la découverte de critères plus pertinents pour les jugements portant sur la scientificité, en l'occurrence des critères qui s'appliquent à une classe d'énoncés auxquels les critères précédents ne pouvaient s'appliquer. (Robert, 1993, p. 197-198).

À l'instar de Lakatos qui a modifié par le haut l'épistémologie poppérienne, en construisant un remaniement progressif de son falsificationnisme, par la proposition notamment d'un nouveau critère de scientificité distinguant noyau/ceinture et mettant en place une théorie des changements de problématiques Robert propose le rationalisme interactionniste à partir de l'idée lakatosienne de la possibilité de



progrès par l'élaboration d'hypothèses auxiliaires immunisantes. Ce remaniement est progressif puisque le nouveau critère de scientificité qu'il préconise permet, avec la distinction noyau/ceinture et la théorie des changements de problématiques, de mieux rendre compte de l'histoire des sciences que ne pouvait le faire le falsificationnisme poppérien.

Les principales contributions que la théorie épistémologique de Robert tente de réaliser sont de formuler une théorie interactionniste, c'est-à-dire abductionniste et correctionniste de la découverte et de la justification, de façon à formuler un critère de scientificité plus satisfaisant tout en rendant compte de l'histoire de la connaissance avec un instrument encore plus souple et plus prédictif que l'opposition du noyau dur et de la ceinture protectrice qui manque de souplesse. Alors que le caractère falsificationniste de l'épistémologie lakatosienne fait de Lakatos un néo-popperien, le rationalisme interactionniste se considère comme un nouveau programme de recherche non falsificationniste ; l'interactionnisme implicite de Lakatos fait du rationalisme interactionniste un programme de recherche qui se décline comme un remaniement d'un programme lakatosien implicitement interactionniste.

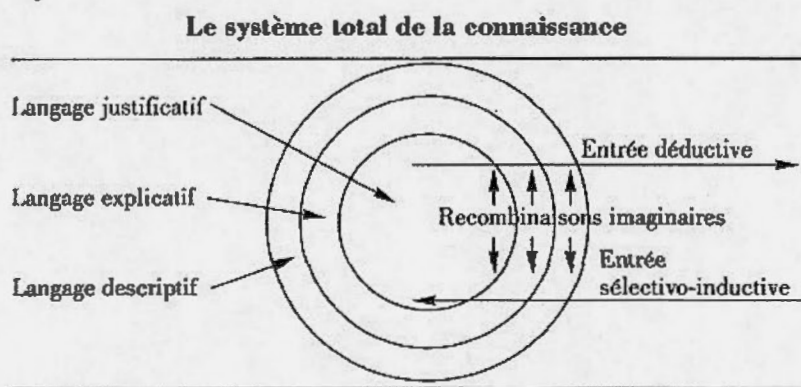


Figure 4.1 : Le système total de la connaissance selon Serge Robert, *Les mécanismes de la découverte scientifique*, p. 120

Ainsi, la valeur en « devenir-vrai » ou en « devenir-faux » d'un projet ou d'un programme de recherche est considérée comme une valeur à la fois relative à la valeur des thèses concurrentes et à la valeur des thèses de niveau supérieur sur lesquelles il s'appuie. Cette valeur étant toujours également relative à nos intérêts de connaissance et aux limites de notre environnement, diversifier nos intérêts ou reculer les limites de notre environnement, tout en circonscrivant la portée de notre savoir, crée de nouveaux problèmes cognitifs à résoudre. En conséquence, pour le philosophe correctionniste, la science est objectivement valable, bien qu'elle soit en partie construite par une activité psychologique intense (Robert, 1993, p. 252-253). Le correctionnisme présente l'activité scientifique comme une fonction de correction sur un système à trois niveaux de langage, par des modifications qui ont pour but d'éliminer les inconsistances qui peuvent être soit horizontales, c'est-à-dire internes à un niveau de langage, ou verticales ce qui signifie qu'elles portent sur la relation théorie/expérience impliquée par la relation entre deux niveaux de langage successifs. Résoudre un problème horizontal est une question essentiellement théorique qui procède à des ajustements logiques au sein des théories pouvant mener ainsi prioritairement à un progrès théorique. Résoudre un problème vertical, en revanche, consiste à ajuster entre eux des niveaux de langage différents, afin de mieux harmoniser les dimensions théorique et empirique du langage cognitif de manière à corroborer davantage le système de la connaissance dans ses prédictions qui progressent empiriquement de cette façon. Dans cette veine, on peut convenir avec Robert qu'une théorie scientifique est un cadre où se produisent les corrections verticales et horizontales en vue de faire progresser empiriquement la théorie. Toutefois, même s'il arrive qu'une théorie non scientifique résolve des problèmes horizontaux, c'est son incapacité à résoudre ses problèmes verticaux qui la caractérise et qui fait que nul n'est en mesure de dire si elle progresse ou dégénère (Robert, 1993, p. 206). En fait, nous dit Robert :

Devant une théorie qui n'a pas été modifiée et qui n'a pas encore rencontré de contre-exemple, on est incapable de déterminer sa valeur cognitive, parce qu'elle ne s'est pas encore frottée au tribunal de l'expérience, elle n'a pas tenté de résoudre des problèmes verticaux. Sans contre-exemples, une théorie ne peut se faire assigner qu'une valeur subjective de probabilité, mais pas une valeur objective. Après qu'une théorie a subi

au moins une modification pour résoudre un problème vertical, on est assuré qu'elle est confrontée minimalement à l'expérience, assurance qui était précisément ce qui manquait à la théorie probabiliste carnapienne. On peut donc utiliser le probabilisme carnapien dans un cadre correctionniste et lui donner une valeur de mesure objective, si on interprète cette mesure de probabilité comme une plus ou moins grande réussite dans la résolution de problèmes verticaux, dont le contenu comprend une part d'objectivité. Mesurer le degré de corroboration des prédictions d'une hypothèse possède une valeur objective, quand cette hypothèse est une réaction à une première hypothèse qui a rencontré des contre-exemples. En effet, si la première hypothèse a rencontré des contre-exemples, c'est qu'elle fait objectivement problème. Si la deuxième est un remaniement de la première et est plus corroborée, elle résout, au moins partiellement, un problème objectif, et est donc objectivement plus valable que la première. Si, par contre, la deuxième vient s'ajouter à la première et donne un tout plus corroboré, alors la première hypothèse augmentée de la deuxième est objectivement plus valable que la première seule. Si, au contraire, une modification à une théorie scientifique accroît les problèmes verticaux, alors la modification est une perte d'objectivité relativement à l'état antérieur de la théorie. (Robert, 1993, p. 205).

On peut donc conclure avec le correctionniste que les théories scientifiques ne sont pas objectivement falsifiables, mais elles sont objectivement corrigibles. Ce qui implique que l'on ne peut pas déterminer la valeur objective absolue des théories scientifiques. Par contre, on peut comparer leur valeur objective relative à condition que les théories évaluées appartiennent à la même dynamique cognitive et qu'elles constituent des états historiques distincts et successifs d'un même processus cognitif, comme nous l'avons indiqué précédemment. Le correctionnisme s'impose ainsi comme le critère de la scientificité pour le rationalisme interactionniste (Robert, 1993, p. 205).

Par ailleurs, le correctionnisme fournit un critère de choix rationnel entre théories scientifiques concurrentes. Ainsi, si une théorie scientifique a le degré de corroboration de ses prédictions le plus élevé relativement à ses concurrentes et qu'elle résout mieux les problèmes, alors c'est elle qui a le plus haut taux de progrès. Une telle théorie serait donc progressive, contrairement à une autre chez qui ce niveau de performance diminuerait, la rendant dégénéréscente *de facto*. Par contre, lorsque la corroboration des prédictions après modification est totale, le problème qui a présidé à la modification peut être considéré comme résolu jusqu'à l'apparition des prochains contre-exemples. Même si le problème auquel est confronté le programme de recherche n'est pas nécessairement éliminé, mais juste atténué, dès

que le degré de corroboration des prédictions augmente on est fondé de dire qu'il y a néanmoins progrès. En revanche, lorsque le degré de corroboration des prédictions diminue, le problème est amplifié, ce qui est synonyme d'une certaine dégénérescence. Ainsi, soutient Robert, « la progressivité d'une théorie scientifique, qui est sa valeur objective relative à la valeur des autres théories, est inversement proportionnelle à l'envergure de ses problèmes non résolus. » (Robert, 1993, p. 207).

Se référant au pragmatisme de Laudan (1977) qui soutient que c'est parce que la science progresse en résolvant des problèmes qu'elle est rationnelle, Robert défend l'idée que le correctionnisme peut être considéré comme un rationalisme pragmatique dans le cadre duquel être rationnel et tenter de résoudre des problèmes sont équivalents. Il s'oppose ainsi au point de vue rationaliste de Popper et de Lakatos soutenant que c'est la relation inverse, à savoir que c'est être rationnel qui entraîne que l'on progresse. Il convient aussi de préciser que le correctionnisme s'applique indifféremment aux hypothèses universelles strictes ou statistiques strictes puisque les modifications à une hypothèse universelle stricte apportent habituellement des corrections qualitatives à propos du contenu des hypothèses ; alors que les modifications à une hypothèse statistique stricte apportent habituellement des corrections quantitatives, en termes de correction des pourcentages d'individus affectés par telle ou telle propriété. De plus, il n'est pas exclu que l'on corrige une hypothèse universelle stricte en la rendant statistique stricte, ou que l'on corrige une hypothèse statistique stricte par des modifications de contenu. Pour Robert, quoi qu'il en soit, et quel que soit le cas de figure, le degré de progressivité reste évaluable objectivement (Robert, 1993, p. 207). Il conçoit les énoncés descriptifs ainsi que tout notre système de connaissance comme étant relatifs aux sélections et aux inductions que nous faisons dans notre perception. Ils sont donc relatifs aux limites de notre environnement et aux limites de nos intérêts pour connaître. Quand on réussit, en adéquation avec les critères correctionnistes du progrès, à établir qu'un projet ou programme de recherche est plus progressif qu'un autre, on lui accorde, par le fait même, qu'il est plus objectif, plus près de la



vérité que son concurrent. En effet, il ressort clairement qu'il résout plus de problèmes verticaux de consistance entre le théorique et l'empirique (Robert, p. 216).

Enfin, par son correctionnisme, Serge Robert pense résoudre de nombreux problèmes en rendant possible la connaissance humaine par notre sensibilité perceptuelle aux contre-exemples relatifs à nos anticipations et par notre aptitude mentale à la correction de nos hypothèses face à ces contre-exemples. Il espère ainsi arriver à faire de notre activité cognitive une fonctionnalité gérée par un principe statique d'inertie qui nous porte à garder nos hypothèses lorsqu'elles ne rencontrent pas de contre-exemple, et un principe dynamique de consistance, qui nous incite à les corriger devant les contre-exemples, de façon à parvenir à rétablir la consistance entre nos hypothèses et les observables. Une fois cette consistance rétablie par une correction appropriée, on peut parler de progrès cognitif ou d'apprentissage. Pour terminer notre propos sur le modèle robertien, laissons à son concepteur le soin de résumer sa démarche :

Notre critique nous amène à parler d'abandon du programme de recherche, plutôt que de falsification, et nous conduit précisément à l'idée d'introduire une nouvelle norme. Pour éviter de sombrer dans l'erreur inductiviste, on peut dire que le processus qui se produit est le suivant : lorsque le centre plutôt rigide du programme rencontre un contre-exemple empirique, on est porté à lui ajouter une hypothèse auxiliaire, qui constitue une correction du système cognitif. La corroboration des conséquences prédictives de cette correction nous incite à maintenir le système dans sa nouvelle version. Par contre, une non-corroboration de ces conséquences nous incite plutôt à faire une nouvelle correction, et ainsi de suite. Quand la correction est plus majeure, elle peut aller jusqu'à remanier les thèses plus centrales et constituer quelque chose comme ce qui correspond chez Lakatos à un changement de programme de recherche. Par contre, lorsqu'elle est plus mineure, la correction ne concerne que la ceinture. Dans cette perspective, la position épistémologique qui nous apparaît la plus pertinente n'est pas un falsificationnisme, mais ce que nous appelons un « correctionnisme ». (Robert, 2009, p. 426).

Au terme de notre analyse des philosophies des sciences lakatosienne et robertienne, il apparaît qu'il n'a pas été beaucoup question de technologie dans leurs systèmes respectifs. Or, nous avons vu que pour prétendre au titre de philosophie des nanotechnosciences, une condition *sine qua non* est d'accorder à la dimension

technologique une place et un rôle au moins tout aussi importants que ceux habituellement accordés à la théorie. Nous allons donc essayer de voir quel traitement a été fait de ce volet fondamental dans les programmes de recherche développés respectivement par Imre Lakatos et Serge Robert.

#### 4.2. Programme de recherche, correctionnisme et technologie

Dès *La formation de l'esprit scientifique*, c'est-à-dire quatre ans après la publication de *La logique de la découverte scientifique* de Karl Popper, Gaston Bachelard soutenait l'idée d'un « nouveau rationalisme » correspondant, selon lui à « une forte union de l'expérience et de la raison. » (Bachelard, 2004/1938, p. 74). Dans cette optique, il soutenait :

Un concept est devenu scientifique dans la proportion où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique de réalisation. On sent donc bien que le problème de la pensée scientifique moderne est, de nouveau, un problème philosophiquement intermédiaire. (Bachelard, 2004, p. 75).

Dit autrement, la philosophie des sciences post-bachelardienne, celle de Kuhn, Lakatos et Robert, ne devrait pas pouvoir faire l'économie de la technologie dans ses programmes de recherche. Si elle y est arrivée malgré tout, l'avènement des nanotechnosciences lui laisse moins d'échappatoires. En effet, la charge technologique y est tellement perceptible qu'il serait vain de la nier ou de vouloir en faire abstraction. C'est la raison pour laquelle nous cherchons à déterminer la place réservée à la technologie par les différentes philosophies que nous venons d'examiner avant de les envisager comme possibles philosophies des nanotechnosciences. Cette condition pourrait ne pas être suffisante, mais elle est bien nécessaire à la réalisation de tout projet de construction d'une « nanophilosophie ».

Par une analyse lexicométrique approximative et comparative, nous tenterons ci-dessous d'établir les carences des philosophies lakatosienne et robertienne qui, en définitive, n'ont pas pu amender la pensée de Kuhn sur cette question précise de la place à accorder à la technologie.

#### 4.2.1. Lakatos et les technologies

Notons que Lakatos reconnaît bien l'importance de la dimension technologique dans la vie du programme de recherche, mais à l'instar de Kuhn, il l'externalise et la subordonne lui aussi à la théorie tout en étant conscient du rôle clef qu'elle devrait jouer dans son système. Dans le premier volume des *Philosophical Papers*, il affirme que « la méthodologie des programmes de recherche – comme toute autre théorie de la rationalité scientifique – doit être complétée par une histoire empirique-externe. » (Lakatos, 1978a, p. 114).

En cherchant les occurrences de lexèmes indicateurs susceptibles de révéler la place accordée à tout ce qui touche la technologie dans différents ouvrages de Lakatos, les deux *Philosophical Papers* notamment, ainsi que la traduction de Luce Giard que nous avons évoquée à de nombreuses reprises précédemment, nous nous apercevons que la dimension technologique inséparable de la science n'est vraiment pas le point focal de Lakatos. En effet, en nous intéressant de plus près à *Histoire et méthodologie des sciences*<sup>77</sup>, nous avons noté 34 occurrences du mot « technique » et quelques dérivés dont 6 sont à mettre sur le compte de l'auteur de la longue introduction qui présente Lakatos et sa philosophie. Ce qui ramène ce nombre à 28. En examinant les différents recours à ces termes, nous nous rendons compte du fait qu'alors que le concept « science » revient au moins 585 fois tout au long de l'ouvrage, celui relatif à tout ce qui est technique peine à atteindre la quarantaine d'apparitions.

<sup>77</sup> Statistiques approximatives tirées de Lakatos 1994 : « Science » et dérivés : 3067 ; « Technologie » et dérivés : 70 (2,28%) ; « Expérience » et dérivés : 375 (12,22%) ; « Technologie » et « expérience » : 70 + 375 = 445 (14,50%).

Même en appliquant le principe de charité à Lakatos, en cherchant d'autres formes de référence à la dimension empirique de sa théorie, nous obtenons dans la totalité du texte une seule occurrence du mot « outillage », une d'« appareillage » et une d'« appareil » qui est trompeuse, comme cela arrive bien souvent chez le Magyar, puisqu'elle se réfère à l'« appareil mathématique du programme » (Lakatos, 1994, p. 164). Puis nous avons cinq usages des lexèmes « machine » et deux de « machinerie ».

En poussant plus loin nos investigations, notamment vers les volumes 1 et 2 des *Philosophical Papers*, nous recensons dans le premier tome<sup>78</sup> 3067 recours au terme « science » et ses dérivés excluant « pseudoscience ». Mais à ce chiffre, nous n'avons pu opposer que 70 utilisations des mots « technique » et ses dérivés dans le même ouvrage (titres et références exclus), « instrument », « tool », « machine », « apparatus » et « device », soit 37 usages de « technique », 12 de « machine », 11 de « instrument », 6 de « device », 2 d'« apparatus » et 2 de « tool » leurs dérivés y compris, bien entendu. Ce qui signifie que pour 100 utilisations du mot « science », il y a moins de 3 références à un morphème qui pourrait renvoyer à la technologie (le ratio exact est de 2,28%). Cet état de fait pourrait permettre d'affirmer que la partie technologique de la science n'est pas au cœur du propos de Lakatos. Et ce, d'autant plus qu'une bonne partie de ces mots-clefs est utilisée dans un sens qui n'a rien à voir avec un contenu technologique quelconque. On peut dénoter effectivement dans ce premier volume que technique renvoie bien souvent à des expressions comme « *sophisticated mathematical techniques* » (Lakatos, 1978a, p. 4, 12), « *technical terms* » (Lakatos, 1978a, p. 27, 47, p. 61, p. 69, p. 136, p. 178), « *statistical techniques* » (Lakatos, 1978a, p. 88) « *technical sens* » (Lakatos, 1978a, p. 101, 113), « *technical term* » et « *technical conception* » (Lakatos, 1978a, p. 101), etc.

<sup>78</sup> Statistiques approximatives extraites de Lakatos 1978a : « Science » et dérivés : 3067 « Technologie » et dérivés : 70 (2,28%) ; « Expérience » et dérivés : 375 (12,22%) ; « Technologie » et « expérience » : 70 + 375 = 445 (14,50%).



Quant au second volume<sup>79</sup>, même si la science n'y fut pas le principal sujet d'étude (voici l'intitulé de l'ouvrage : *Mathematics, science and epistemology Philosophical Papers*), Lakatos y recourt bien plus que dans le précédent à l'univers lexicologique de la technologie. Ainsi, nous y avons répertorié 1120 recours au mot « science » ainsi que ses dérivés contre 101 références à « technique » sans que celles-ci ne renvoient systématiquement, nous le verrons, à leur sens empirique ou expérimental. Ainsi, toujours en excluant les apparitions dans les titres et les références, nous avons comptabilisé 62 usages des mots « technic » et ses dérivés, 24 occurrences de « machine », 7 de « instrument », 6 de « tool » et 2 occurrences d'« apparatus » et leurs dérivés, le mot « device-s » n'y figurant nulle part. Il ressort de notre analyse qu'il y a un ratio plus élevé de charge technologique dans ce volume qui traite de mathématiques, science et épistémologie que dans le précédent. Néanmoins, il reste assez insignifiant, car pour 10 recours au concept de « science » et ses dérivés, il y a environ deux références à un mot susceptible de renvoyer à la dimension technologique de l'activité scientifique soit 21,51%. Cependant, même ces proportions finissent par retomber beaucoup plus bas, dès que l'on s'intéresse au contexte d'utilisation de chaque terme. On verra alors que technique renvoie bien souvent à des expressions comme « statistical techniques » (Lakatos, 1978b, p. 199), « technical sens » (Lakatos, 1978b, p. 176), « technical term » (Lakatos, 1978b, p. 119, 136, 230, 231, 232, 234), etc. Du coup, nos statistiques lexicométriques retombent plus bas que ce qu'ont révélé nos premiers chiffres. Néanmoins, nous ne pouvons encore conclure à l'externalisation, la sous-traitance ou l'insignifiance de la dimension technologique dans le système lakatosien.

En effet, plutôt que de nous limiter à ces premières données livrées par notre première analyse, ajoutons « expérience » et « expérimental » à nos mots-clefs. Dès lors, les choses changent assez significativement. Si nous revenons à la traduction

---

<sup>79</sup> Statistiques approximatives tirées de Lakatos 1978b : Science et dérivés : 1120 ; Technologie et dérivés : 101 (9,01%) ; Expérience et dérivés : 140 (12,5%) ; « Technologie » et « expérience » : 101 + 140 = 241 (21,51%).

française de Luce Giard que nous avons examinée en premier ci-dessus, en intégrant ces deux concepts et leurs dérivés nous obtenons 273 occurrences, soit un ratio de 46.66%, c'est-à-dire quasiment pour chaque référence à l'expérimental nous pouvons rapporter 2 recours aux morphèmes « science » et ses dérivés. Ce rapport atteint les proportions les plus élevées quand nous examinons *The methodology of scientific research Programmes Philosophical Papers*, Volume I (1978a). Dans cet ouvrage, nous pouvons relever un recours quasi équivalent aux termes relatifs à l'expérimentation qu'à ceux évoquant la science. Ainsi, sur 10 recours aux mots « science » et ses dérivés, nous pouvons en compter 8 pour « expérience », « expérimental » et leurs dérivés, soit de 80,36%. En revanche, dès que l'on passe à l'examen du second volume des *Philosophical Papers* (1978b), ce ratio tombe à environ 1,5 pour 10 ou 14% précisément. Il n'en demeure pas moins qu'au total, en prenant ensemble ces trois ouvrages de Lakatos, le taux d'usage des lexèmes relatifs à l'expérimental par rapport à la science est de 47%. Et, si nous excluons la traduction française qui reprend quelques chapitres du tome 1 des *philosophical Papers*, nous obtenons un bien meilleur score de 63,51% qui est très respectable, relativement notamment à celui de Thomas Kuhn dans *La structure des révolutions scientifiques* qui ne dépasserait pas 19,29%, soit 2 pour 10.

Néanmoins, comme le dit Lakatos lui-même dans le second volume des *Philosophical Papers* (1978b, p. 183) « le choix technologique suit le choix scientifique ». Ce qui signifie qu'il ne nie pas l'importance de la dimension technologique dans l'entreprise gnoséologique, mais celle-ci reste tributaire de la théorie scientifique qui mène la danse. Nonobstant cette catégorisation, dans sa philosophie il reste conscient de l'importance de la technologie et reproche même à Popper de ne pas lui accorder assez d'importance. C'est dans cette optique qu'il se joint à Watkins pour reprocher au père du faillibilisme d'avoir une théorie de la corroboration-évaluation qui est analytique et n'a pas d'implications prédictives. Puis, que la doctrine de la corroboration de Popper maintient un silence de plomb sur les perspectives d'avenir de la théorie scientifique. (Lakatos, 1978b, p. 189). Mais, estime-t-il, si tous les états encore non vérifiés des choses étaient également

possibles, le degré de rationalité de la croyance en une proposition particulière encore non testée serait nul. En effet, parfois il y a de quoi se demander si Popper et Watkins ne regarderaient pas toute estimation de l'acceptabilité<sub>3</sub>, comme un acte criminel d'« induction ». Qu'est-ce, donc, que l'acceptabilité<sub>3</sub> ?

En fait, « acceptabilité<sub>3</sub> » est un des trois modes d'acceptation possibles des théories scientifiques permettant de caractériser leur vérisimilitude. Ainsi, à la question : « quelles sont les théories les plus « vérisimilaires » ? », Lakatos répond :

Je pense que celles-ci peuvent (en principe) être construites de la manière suivante : nous prenons le « corps de la science » existant et remplaçons chaque théorie réfutée en lui par une version plus faible non réfutée. Ainsi, nous augmentons la vérisimilitude présumée de chaque théorie, et tournons le corps incohérent des théories scientifiques (acceptée<sub>1</sub> et acceptée<sub>2</sub>) en un ensemble cohérent de théories accepté<sub>3</sub> que nous pouvons appeler, car elles peuvent être recommandées pour l'usage dans la technologie, le « corps des théories technologiques ». Bien sûr, certaines théories accepté<sub>3</sub>, ne seront pas acceptable<sub>1</sub> ou acceptable<sub>2</sub>, puisque nous sommes arrivés à eux par des stratagèmes de réduction de contenu ; mais ici, nous ne visons pas la croissance scientifique, mais à la fiabilité.

Ce modèle simple est une reconstruction rationnelle de la pratique réelle du choix de la théorie la plus fiable. Le choix technologique suit le choix scientifique: les théories acceptable<sub>3</sub> sont des versions modifiées des théories acceptable<sub>1</sub> et acceptable<sub>2</sub>: le chemin des théories acceptable<sub>3</sub> mène à travers les théories acceptable<sub>1</sub> et acceptable<sub>2</sub>. *Parce que l'évaluation de la fiabilité des expertises méthodologiques est indispensable.* (Lakatos, 1978b, p. 183).

Il convient de préciser ici que « acceptable<sub>1</sub> » et « acceptable<sub>2</sub> » évaluent la croissance réalisée par une théorie par rapport à une théorie de base. Ainsi, la première évaluation, basée sur l'excès de contenu empirique, est une question de logique et on peut dire qu'elle est tautologique. La deuxième évaluation, quant à elle, a deux interprétations. En effet, entendue comme une évaluation « tautologique », elle affirme que la nouvelle théorie a survécu à un test auquel la théorie de référence n'a pas survécu. Pour Lakatos, « cela seul peut servir d'évaluation de la croissance. » (Lakatos, 1978b, p. 191). En revanche, soutient-il, interprétée comme une appréciation synthétique, avec le lemme métaphysique faillible selon lequel excès de corroboration signifie excès de contenu de vérité, la deuxième évaluation estime de façon optimiste que la croissance est réelle, que la nouvelle théorie au moins dans le « champ d'application » du test, est plus proche

de la vérité que sa théorie de référence. C'est ainsi que se démarquant une fois de plus de Popper, Lakatos considère la théorie acceptée<sub>0</sub> comme un principe régulateur des programmes de recherche caractérisée par la réfutabilité, mais insuffisante pour décider de l'élimination d'une théorie (Lakatos, 1978b, p. 177). Puis, vient l'étape qui constitue la première évaluation préalable de la théorie qui suit immédiatement sa proposition : celle de son « audace » dont un des aspects les plus importants peut être caractérisé en termes d'« excès de contenu empirique<sup>80</sup> » ou d'« excès de contenu », ou encore d'« excès d'informations » ou d'« excès de falsifiabilité », selon Lakatos. De ce fait, pour ce dernier, une théorie audacieuse doit avoir de nouveaux falsificateurs potentiels qu'aucune des théories dans le corps existant de la science n'a eus avant elle. En particulier, elle doit avoir un contenu dépassant celui de sa « théorie de base » (ou « théorie de référence »), soit plus que la théorie qu'il remet en cause. La théorie de base en question peut n'avoir pas été formulée au moment où la nouvelle théorie est proposée ; mais, dans un tel cas, elle peut facilement être reconstruite. Celle-ci peut être un double ou même une théorie multiple dans le sens où « si les connaissances de base pertinentes consistent en une théorie  $T_1$  et en son hypothèse de falsification  $T'_1$  alors une théorie concurrente  $T_2$  n'est audacieuse que si elle entraîne une nouvelle hypothèse factuelle qui n'avait été impliquée ni par  $T_1$  ni par  $T'_1$ . » (Lakatos, 1978b, p. 170, notre traduction). Acceptabilité<sub>2</sub>, par contre, est axée sur la corroboration, puisque s'il n'y a pas d'excès de corroboration, il n'y a pas de faits nouveaux, ce qui conduit à l'élimination de la théorie (Lakatos, 1978b, p. 177). En conséquence :

Les théories audacieuses après avoir été sévèrement testées sont soumises à une deuxième évaluation « postérieure ». Une théorie est « *strictement corroborée* » si elle a résisté à *quelque* hypothèse falsifiante, ce qui signifie, si *quelque* conséquence de la théorie survit à un test sévère. Il devient alors « acceptée<sub>2</sub> » dans le corps de la science. Une théorie est « *strictement corroborée au temps t* » si elle a été soumise à des tests sévères et n'a été réfutée par aucun test après cet instant t.

Un test sévère de T par rapport à une théorie de base T' teste, par définition, l'excès de contenu de T sur T'. Mais alors une théorie T est corroborée par rapport à T' si le dépassement de T est corroboré ou si elle a un « excédent de corroboration »

<sup>80</sup> Sur la notion de « contenu empirique » voir Popper (1934, § 3sq), selon qui le contenu empirique d'une théorie est son ensemble de « falsificateurs potentiels ». Pour lui, (1) l'information empirique qu'une phrase exprime est l'ensemble des états de choses qu'elle interdit et (2) cette information peut être mesurée par l'improbabilité plutôt que la probabilité. (Cf. Lakatos, 1978b, p. 170).



sur sa théorie de base. Nous pouvons aussi dire qu'une théorie est corroborée ou acceptée<sub>2</sub> s'il est démontré qu'elle entraîne certains nouveaux faits. Ainsi, tout comme « acceptabilité<sub>1</sub> » est liée à l'excès de contenu « acceptabilité<sub>2</sub> » est liée à l'excès de corroboration. Ceci est bien sûr en accord avec l'idée (popperienne) selon laquelle ce sont les frontières à l'évolution problématiques de la connaissance, et non le contenu de sa base relativement solide, qui donne à la science son caractère scientifique ; selon le justificationnisme c'est tout l'inverse. (Lakatos, 1978b, p. 174).

La troisième évaluation correspondant à l'acceptation<sub>3</sub>, quant à elle, compare la totale corroboration des preuves à l'appui des théories. Du coup, prévient le Magyar, si nous l'interprétons comme une évaluation « tautologique », il se bornerait à établir un bilan des succès et des échecs des programmes de recherche qui ont mené aux théories comparées. Mais alors, il pourrait être trompeur de l'appeler évaluation de « corroboration de preuve », car pourquoi même les plus grandes victoires passées donneraient-elles, sans aucune hypothèse métaphysique supplémentaire, une véritable « corroboration » à la théorie ? En fait, ils ne corroborent la théorie qu'en supposant le principe métaphysique selon lequel l'augmentation de la corroboration est un signe de vérisimilitude croissante. Ainsi y a-t-il deux concepts de « corroboration de preuve » : l'un, évaluant « tautologiquement » les tests auxquels la théorie dans sa préhistoire (ou le « programme de recherche » menant à elle) a survécu ; l'autre, avec l'aide de lemmes métaphysiques, évaluant synthétiquement son aptitude à survivre dans le sens où plus elle aura de vérisimilitude, plus elle sera en mesure de « survivre ». (Lakatos, 1978b, p. 191).

Afin de mieux comprendre cette catégorisation en trois moments, il peut être utile de recourir à celle de Carnap dont Lakatos salue l'importance et la pertinence pour définir les degrés de confirmation ou de fiabilité en trois approches. La première, « *l'approche théorique* », commence par définir la fiabilité des théories et la fiabilité des « prédictions » en dérive. La seconde, « *l'approche non-théorique* », quant à elle, se déroule en sens inverse. Elle commence par définir la fiabilité des prévisions tout en étant garante de celle des théories qui en découlent. La troisième enfin, qualifiée d'« *approche mixte* », définit la fiabilité tant des théories que des prédictions en une seule formule. Cela étant, alors que Carnap hésite entre la deuxième et la troisième formule, Lakatos dit opter pour la première, c'est-à-dire

l'approche théorique, qu'il considère comme ayant été systématiquement ignorée par les logiciens inductivistes malgré le fait qu'elle est généralement utilisée dans la pratique. Le concepteur des programmes de recherche croit bon de prodiguer aux ingénieurs le comportement idéal suivant : « au lieu de faire confiance à une prédiction selon les *c*-valeurs obtenues par une méthode athéorique compliquée basée sur un langage formel, l'ingénieur va, en matière de fait, préférer les prédictions de la théorie la plus avancée du moment. » (Lakatos, 1978b, p. 192). Ce qui confirme la subordination de la technologie à la théorie la plus avancée. Afin de déterminer cette dernière, il recommande de recourir à ce qu'il appelle un « quotient rationnel de pari » (Lakatos, 1978b, p. 192-193) sur la probabilité de la théorie la plus fiable. D'un autre côté, il suggère une règle pratique selon laquelle, il faut « *agir sur les théories non réfutées qui sont « contenues » dans le corps existant de la science, plutôt que sur des théories qui ne le sont pas.* » (Lakatos, 1978b, p. 192, c'est Lakatos qui souligne).

En outre, il déplore l'une des implications d'une appréciation analytique des théories scientifiques par Popper qui entraînerait que celui-ci ne pourrait pas expliquer comment la science peut être un « guide de vie ». En effet, selon le philosophe hongrois, « si le degré de corroboration ne sert pas comme une estimation, quoique faillible, de la vérisimilitude, alors Popper ne peut pas expliquer la rationalité de nos actions concrètes, ne peut avoir aucune philosophie pratique et surtout, une philosophie de la technologie *basée sur la science.* » (Lakatos, 1978b, p. 189). Il poursuit sa critique en précisant que l'une des réactions de Popper et de certains de ses disciples ajoute à une doctrine curieuse l'idée que la rationalité pratique est indépendante de la rationalité scientifique. Popper va jusqu'à soutenir que, pour des raisons pratiques, de fausses théories s'appliquent souvent assez bien et que la plupart des formules utilisées dans l'ingénierie ou la navigation sont connues pour être fausses<sup>81</sup>. On peut donc comprendre aisément pourquoi Popper snobe la

---

<sup>81</sup> Karl Popper. 2006. *Conjectures et réfutation* : « Or, dans une perspective pragmatique le problème ne se pose pas, puisque les théories fausses sont souvent suffisantes pour la pratique : on sait que la plupart des formules utilisées en matière de génie ou de navigation sont fausses, bien qu'elles

technologie et la relègue au second plan dans sa conception épistémologique ; et ce d'autant plus qu'il soutient en le soulignant que « *seule la fausseté d'une théorie est susceptible d'être inférée des données empiriques, et cette sorte d'inférence est purement déductive.* » (Popper, 2006 [1963], p. 91). Par conséquent, il ne serait pas faux de dire que chez Popper, il n'y a de science que déductive. D'un autre côté, Watkins renforce l'idée que Lakatos se fait de la position des popperiens quand il explique que leur méthode de « sélection-d'hypothèse » (*hypothesis-selection*) dans la vie pratique devrait être bien adaptée à nos objectifs pratiques, tout comme les méthodes d'« sélection-d'hypothèse » dans les sciences théoriques doivent être bien adaptées à nos objectifs théoriques, et que les deux types de méthode pourraient très bien produire des réponses différentes. Par ailleurs, Watkins affirme qu'une théorie peut très bien être à la fois mieux corroborée par les tests passés et être moins susceptible de survivre à de futurs tests. Donc, la fiabilité peut même être inversement proportionnelle à la corroboration. Ce qui permet à Lakatos de se demander si cela ne signifie pas pour Popper et ses disciples : « à bas la science appliquée ? » (Lakatos, 1978b, p. 189-190). Et pourtant, Lakatos reconnaît qu'il y a malgré tout de solides indications qui permettent d'affirmer que pour les popperiens, la science est un guide de vie.

Par exemple, nous dit-il, Popper écrit : « Certes, il est parfaitement raisonnable de croire que ... les lois bien testées continueront à tenir (car nous n'avons pas de meilleure hypothèse pour les changer), mais il est aussi raisonnable de croire qu'une telle démarche nous conduira parfois vers de graves ennuis. » Par ailleurs, il semble même insinuer que ce degré de corroboration peut être une estimation raisonnable de vérisimilitude. Et j'ai déjà mentionné son unique déclaration selon laquelle le « degré de la corroboration » peut être interprété comme un « degré de croyance rationnelle ». (Lakatos, 1978b, p. 189-190 (notre traduction). Citation de Popper extraite de la première édition (1963) de *Conjectures and Refutations*, p. 235).

En fait, Lakatos estime que la position de Popper est plutôt ambiguë et difficile à déterminer puisqu'elle se présente parfois comme « guide de vie » et d'autre fois non. Selon le Magyar, cela est lié à son rejet catégorique de la méthode inductive qu'il a préféré remplacer par une logique de la découverte dominée par la théorie.

---

puissent constituer d'excellentes approximations et être d'un emploi commode ; ceux qui les utilisent s'y fient en sachant qu'elles sont fausses. » p. 93.

De son avis, Popper rejette toute possibilité de logique inductive puisque celle-ci reposerait sur quelque principe synthétique *a priori*. Aussi soutient-il :

Sur cette interprétation de la position de Popper, une théorie de l'acceptabilité<sub>3</sub> ne serait inductiviste que si elle prétendait être *a priori* vraie et/ou si elle était probabiliste, et il n'y aurait rien de mal à une estimation conjecturale, non probabiliste de l'acceptabilité<sub>3</sub> des théories ou avec les spéculations métaphysiques non-inductives qui peuvent sous-tendre une telle estimation. Mais l'insistance de Popper, que son degré de corroboration - contrairement à Reichenbach ou au degré de confirmation de Carnap - est analytique et ne doit pas être interprétée comme étant synthétique, équivaut à une opposition à toute idée d'acceptabilité<sub>3</sub>. Cela implique une séparation nette entre la rationalité scientifique et la rationalité pratique, que, en effet, tant Popper que Watkins semblent défendre. Une telle séparation peut en effet être « louche et hypocrite », et mène à une mauvaise interprétation de ce qui se passe réellement dans la technologie. Une escalade de la croisade anti-inductiviste qui fait de toute idée d'acceptabilité<sub>3</sub> une cible ne peut que vicier son efficacité. Elle devrait être explicitement abandonnée, et il faudrait admettre que la science est au moins un guide de vie. (Lakatos, 1978*b*, p. 190-191, notre traduction).

À cet égard, Lakatos estime que le désarroi du camp de Carnap est bien pire que celui des popperiens puisque selon lui la métaphysique aprioriste de Carnap est dissimulée sous un manteau d'analyticité. Les carnapiens, précise-t-il, doivent soit s'en tenir vaille que vaille à l'analyticité de leur logique inductive, sachant que leur probabilité ne peut pas être un guide de vie ; soit ils peuvent décider que la logique inductive est un guide de vie, mais alors ils devront admettre que leur logique inductive est un système complexe de métaphysiques spéculatives. (Lakatos, 1978*b*, p. 191). Peut-être faudrait-il rappeler avec Lakatos qu'une autre raison de la difficulté de ces philosophes des sciences à intégrer la technologie dans leur dispositif théorique tient au fait qu'il est impossible de comparer les degrés de corroboration de nos théories les plus avancées et que dans de nombreuses décisions technologiques les considérations épistémologiques pures jouent un rôle quasi insignifiant. En outre « (...) le fait que bien souvent la fiabilité des théories ne peut pas souffrir la comparaison rend la rationalité pratique *plus indépendante* de la rationalité scientifique que ne le suggère la trop optimiste logique inductive. » (Lakatos, 1978*b*, note de bas de page n° 1, p. 191).



Après ces critiques cinglantes du philosophe hongrois à l'encontre de Popper et de Carnap sur la question de la place de la dimension technologique dans leurs conceptions épistémologiques respectives, on pourrait croire qu'il en tirera toutes les conséquences qui semblent s'imposer afin de donner à l'équation expérimentale la place qu'elle mérite dans la théorie des programmes de recherche. Malheureusement, dans les faits, Lakatos reste un « logothéoricien » selon le mot que nous avons emprunté à Gilbert Hottois. L'explication de ce rendez-vous manqué entre théorie et expérimentation pourrait venir de Luce Giard qui, dans l'introduction qu'elle a consacrée à la traduction d'une partie du premier volume des *Philosophical Papers*, soutenait que le désir de rationalité de Lakatos avait pris le pas sur toutes les autres considérations, en définitive. Il serait peut-être plus édifiant à notre avis de reproduire ici, *in extenso*, son analyse sur la question. Selon Giard, en effet :

Un tel désir de rationalité était bien adapté à un certain type de compréhension des mathématiques, qui furent le premier objet d'étude de Lakatos et ce à quoi l'on doit ses meilleurs textes en épistémologie. Mais il eut, dans ses dernières années, la volonté d'élargir son champ d'investigation à la physique pour éclaircir les problèmes d'empiricité. En fait, quand il traite de physique, il s'occupe de théories, non de processus d'expérimentation. Quand il discute le problème des « expériences cruciales », c'est encore *de jure*, non *de facto*, en relation à sa théorie des « programmes de recherche ». Il a fort clairement expliqué la chose dans son dialogue avec Grünbaum : « Arrivée à maturité, une science n'est pas une procédure par essais et erreurs, consistant en hypothèses isolées, plus leurs confirmations ou leurs réfutations. Les grandes réussites, les grandes « théories » ne sont pas des hypothèses isolées ou des découvertes factuelles, mais des programmes de recherche. (...) Aucune expérience à elle seule ne peut jouer un rôle décisif, et encore moins « crucial », en faisant pencher la balance entre deux programmes de recherche rivaux. ( ... ) Cependant je ne nie pas que quelques expériences ont un effet *psychologique* décisif dans la guerre d'usure entre deux programmes. » Quand Lakatos s'occupe de physique, il s'agit encore de théories et d'équations ; instruments, mesures ou techniciens y font très pâle figure. Ce qu'il préfère en physique, c'est suivre les affrontements théoriques entre deux seigneurs de guerre, capables de produire une physique mathématisée. Rien d'étonnant à ce qu'il ait beaucoup fréquenté Cauchy, homme clé dans la mathématisation de la physique du XIX<sup>e</sup> siècle. Cette dominante mathématique et théorique de sa pensée ne doit pas induire un contresens sur sa conception des mathématiques. Dans cette science, il s'intéresse au non formalisé, à la production de la connaissance qu'il situe dans la relation entretenue avec l'empirie. Pour lui, les mathématiques constituent une science « quasi empirique », d'où son idée de leur appliquer, à titre d'essai, la logique de la découverte scientifique décrite par Popper pour les sciences empiriques. Le cheminement de la preuve mathématique, il le suit à travers l'expérience du travail mathématique. Autant il appelle de ses vœux l'advenue d'un « plus de rationnel », autant il se méfie de la construction exclusivement logique

que les formalistes ont voulu imposer comme idéal de perfection. (Giard, Introduction à Lakatos, 1994, p. XXIV-XXV).

Ce ne sera donc pas dans la philosophie de Lakatos que nous pourrions espérer trouver la philosophie des nanotechnosciences sur la voie de laquelle nous espérons être menés par une philosophie des sciences qui attribuerait au préalable à la technologie la place qui devrait être la sienne. Mais, il serait injuste de ne pas admettre que relativement aux philosophies de Kuhn, Popper et Carnap, Lakatos a une pleine conscience du problème posé par l'exclusion de la technologie du système théorique des épistémologues, mais malheureusement il continue d'en négliger les implications et les conséquences pour la philosophie des sciences en général et la sienne en particulier. Peut-être le correctionnisme de Serge Robert arrivera-t-il à appliquer au falsificationnisme sophistiqué la correction attendue pour lui éviter la dégénérescence à tout le moins sur ce problème précis ? C'est ce que nous allons examiner à présent.

#### 4.2.2. Robert et les technologies

La tournure lakatosienne qu'emprunte la philosophie de Robert pourrait laisser croire que les critiques adressées à son mentor lui seraient opposables, si ce n'est en totalité, du moins en partie. Mais les développements du correctionnisme ne permettent pas de le confondre avec le falsificationnisme sophistiqué du Magyar au point de lui appliquer exactement les mêmes remarques sur la place et le rôle de la technologie, toutefois une partie de cet héritage assumée par Robert s'y prête bien. Tout compte fait, nous ne reviendrons pas sur ce qui a déjà été dit sur les limites de ces aspects de la philosophie des programmes de recherche partagées et revendiquées par le philosophe canadien. En revanche, nous le soumettrons au test lexicométrique à l'instar de ses prédécesseurs, puis nous montrerons que la technologie reste une question importante dont la nécessité est reconnue dans la philosophie correctionniste, mais qu'à l'instar de Kuhn et de Lakatos elle est soustraite et assujettie à la théorie qui concentre toutes les attentions et tous les honneurs. Enfin, nous tenterons de montrer qu'il y a probablement une issue

possible pour la philosophie robertienne en revisitant son holisme à double entrée et en lui suggérant de reconsidérer plus sérieusement l'apport indispensable de la technologie dans l'ensemble du processus de formation du discours et de l'activité scientifique.

Ainsi, en faisant l'analyse lexicographique de *Mécanismes de la découverte scientifique* (Robert, 1993), il apparaît que Robert recourt 1072 fois aux termes « science, scientifique » et leurs dérivés soit comme radicaux ou dans des mots composés (sciences, scientifique-s, scientificité, pseudo-scientifique, métascientifique, etc.). Mais, dès que l'on en vient à s'intéresser à des termes comme « technique » ou « technologie » et leurs dérivés, ce chiffre tombe à 20 occurrences, dont une en note de bas de page. Ce qui correspond à un prorata inférieur à 2 usages d'un terme référant à la technologie pour 10 autres parlant de « science », soit une valeur relative de 1,86%. Cependant, en ajoutant d'autres mots associés à la technologie tels qu'« instrument », « outil », ou « appareil » et leurs dérivés, nous obtenons 11 occurrences pour le premier terme au singulier et au pluriel, 6 occurrences pour le second et 4 pour le troisième et leurs dérivés. Ces données rajoutées à celles livrées précédemment par le recensement des occurrences de « technologie » et ses dérivés fait remonter le ratio du nombre de référence à la dimension technologique dans la philosophie des sciences robertienne à près de 4 pour 10, soit une valeur absolue de 41 apparitions et une valeur relative de 3,82%. En poussant l'examen un peu plus loin, nous nous apercevons qu'en nous intéressant à des termes comme « expérience », « expérimental », « expérimentation » et leurs dérivés, nous obtenons un rapport encore plus élevé de l'ordre de 140 occurrences, ce qui correspond à 13,05%. En définitive, même en mettant bout à bout ces différentes familles de mots, nous ne dépassons guère une référence à la dimension technologique contre cinq à la science, le prorata étant de 18,73%. De plus, si l'on exclut de ces lexèmes ceux qui sont utilisés dans un sens non technologique comme « instruments mathématiques » (Robert, 1993, p. 5), « instrument social » (Robert, 1993, p. 55), « appareil perceptif » (Robert, 1993, p. 57), « instrument formel » (Robert, 1993, p. 150), « techniques de décision » (Robert, 1993, p. 160), « appareil

classificatoire » (Robert, 1993, p. 208), etc., ce rapport pourrait tomber bien plus bas. Ainsi, on peut dire que dans ce texte central de Robert, il est surtout question de « science » et très peu de « technologie ». Mais, comme nous l'avons vu autant avec Kuhn qu'avec Lakatos, cette sous-représentation des morphèmes relatifs à la technologie ne signifie pas automatiquement son exclusion du champ scientifique, mais implique bien souvent sa subordination à la théorie.

En fait, tout se passe comme si ces philosophies des sciences souffraient d'une vision parcellaire qui pourrait être liée au dogme de l'origine grecque de la philosophie qui n'est pas sans rappeler la manière dont le dogme du cercle a pendant longtemps empêché le développement de l'astronomie moderne avec la rupture épistémologique introduite par Képler en recourant aux trajectoires elliptiques des astres après plusieurs siècles d'adhésion aveugle au postulat de la circularité. En effet, si l'on remonte à l'analyse de la philosophie réaliste faite par Serge Robert dans *Les révolutions des savoirs scientifiques* (1978) on s'aperçoit que dans la perspective évolutionniste du développement des savoirs qu'il y prône, la connaissance, à l'image de l'enfance, se forme à l'échelle historique d'abord de façon inductive puisqu'elle s'affûte et se perfectionne en s'émancipant de plus en plus de ses origines matérielles. En fait, tout part de la volonté des présocratiques de trouver un principe universel d'unité et de stabilité du Cosmos. Selon Robert :

Il s'agit donc de rechercher l'unité derrière la multiplicité, la stabilité derrière le mouvement. On accède ainsi à une dissociation de la perception et de la représentation : c'est là le premier signe d'une théorie opératoire de la représentation. Le langage sera totalement dépris des choses, sans qu'aucune analogie ne subsiste entre elles. La science se produira comme organisation représentative du monde que nous livre la vision, mais dans un système rationnel complètement émancipé du monde perçu, ce dernier étant désormais considéré comme chaotique (multiple et sans permanence). (Robert, 1978, p. 200-201).

Selon le père du correctionnisme, la connaissance théorique s'est développée dans la philosophie grecque en plusieurs étapes. D'abord, il y a eu le moment où le principe d'unité et de stabilité était un élément matériel comme l'Eau (Thalès), l'Air (Anaximène), le Feu (Héraclite), tous promus au rang de principe. Puis, il y a eu



l'émergence d'un principe rationnel sans matérialité perceptible comme le nombre et le *nous* (*voûς*) respectivement de Pythagore et d'Anaxagore. Cette phase est suivie d'un troisième moment de rupture caractérisé par le refus du changement générateur de contradictions intolérables pour Parménide qui décrète donc l'unité et la stabilité inaltérable de l'être en niant la possibilité de tout discours sur lui et en tenant la multiplicité et le mouvement pour des apparences trompeuses et des illusions pernicieuses. Héraclite, quant à lui, se focalise sur ce que Parménide rejetait, afin de protéger la possibilité même d'une connaissance certaine et non contradictoire, pour soutenir que seul le changement est constant, donc le devenir, la diversité et partant la contradiction. Toutefois, comme le remarque fort bien Robert, en produisant une telle philosophie du rapport du sensible et de l'intelligible, Parménide et Héraclite mettent en place les principes fondamentaux de la « connaissance opératoire ». « Mais, leurs théories contradictoires entre elles, ne satisfont pas, dans la mesure où, du sensible et de l'intelligible, l'un des deux doit être nié pour permettre l'existence de l'autre. » (Robert, 1978, p. 201). Selon lui, ces trois premières étapes montrent comment les spéculations des philosophes grecs sont un apprentissage de la construction d'une théorie opératoire de la représentation. Avec Platon, la philosophie grecque réussit à concilier dans une quatrième phase les positions tranchées de Parménide et d'Héraclite dont le Maître de l'Académie fait la synthèse dans le cadre d'une théorie générale non réductiviste des rapports du sensible et de l'intelligible explicité par l'Allégorie du Livre VII de *La république* ainsi que celle de la ligne divisée. Mais ce n'est qu'avec Aristote que cette évolution connaît une sorte d'épilogue dans une cinquième et dernière phase qualifiée de « théorie définitivement opératoire de la représentation » (Robert, 1978, p. 203-204). Celle-ci se caractérise par le remplacement des essences transcendantes platoniciennes par un réalisme des substances immanentes. Autrement dit, plus besoin d'un monde des Idées incorruptibles et stables vers lequel l' amoureux de la Sagesse doit nécessairement se tourner pour acquérir le savoir de l'ombre incarnée par ce dont elle est ombre plutôt que l'ombre du savoir qui n'est qu'illusion et versatilité. Ainsi, le Stagirite se démarquant du mysticisme platonicien ramènera tout au monde sensible qu'il revalorise en en faisant le dépositaire à la fois

de la matière sensible et des formes intelligibles. Pour le Maître du Lycée, en effet, les substances, mélange de sensible et d'intelligible constituent la substance du monde. Il rend ainsi possibles la théorie du mouvement et celle du changement comme passage de la puissance à l'acte grâce au recours à la « privation », troisième principe à côté de la matière et de la forme. Ainsi avec Aristote la connaissance se réalise par sa dimension opératoire concrète et dispose pour la première fois de son histoire d'une logique élaborée capable de dresser une théorie de son fonctionnement interne relativement exhaustive. Il élabore donc une théorie du monde basée sur la non-contradiction, l'identité, la différence et la hiérarchisation logique des éléments dans une structure. De ce fait, il insuffle à la théorie de la représentation une nouvelle orientation qui distingue clairement le sujet de l'objet et l'humain du monde. D'où ces mots de Robert :

Ainsi, l'organisation et l'adaptation de la connaissance se dissocient, pour donner chez Aristote, d'une part une logique, et d'autre part une physique. Ce dédoublement du savoir est lui-même lié à l'émergence d'un troisième type de discours : la métaphysique, science du rapport de l'organisation et de l'adaptation de la connaissance. Le savoir est suffisamment dépris des choses pour acquérir une souplesse lui permettant d'exposer des règles de fonctionnement interne au sein d'un système propre, et le monde est suffisamment objectivé pour en faire une théorie distincte de la réduction à la simple logique du sujet. À cause de cette distance qui se déploie entre la logique et la physique, une théorie s'impose pour les relier. Quand le langage acquiert une complexité suffisante pour expliciter ses propres règles de fonctionnement, c'est qu'il a déjà pris suffisamment de distance par rapport aux choses pour que les utilisateurs du langage se rendent automatiquement compte que ce langage n'est pas nécessairement conforme aux choses, que les choses ont une réalité qui échappe au langage. Avec la théorie opératoire de la représentation se pose donc le problème du rapport de la connaissance et des choses ; la possibilité de l'erreur naît et, avec elle, surgit le problème de la vérité. C'est ce dont va traiter la métaphysique, en réconciliant la logique et la physique par une théorie de la vérité, de l'adéquation des choses et de la connaissance qu'on en a. (Robert, 1978, p. 207).

Cette place clef occupée par la métaphysique dans le système d'Aristote permet de garantir à peu de frais, finalement, l'unité et la stabilité tant recherchées par les philosophes. En effet, le monde sensible demeure héraclitéen à bien des égards et l'effet du parricide platonicien sur l'immobilisme parméniidien n'a pu se traduire que par un musellement du monde matériel dénigré à souhait. Même si l'intervention d'Aristote semble redonner à celui-ci la place qu'il mérite dans le système gnoséologique, chez les péripatéticiens la métaphysique domine l'univers de la connaissance en tant que science des causes premières, ou encore science de l'Être en tant qu'Être. Peut-être la prééminence de la théorie sur la technologie et l'expérimentation est-elle à chercher dans cette sorte de péché originel des philosophes qui, très tôt, ont condamné le monde sensible à l'instabilité et à la diversité tout en essayant de le placer sous le joug de l'intelligible dont la métaphysique est l'expression la plus achevée ? Ou alors, est-ce plutôt la faute à Hegel qui a toujours défendu l'idée que c'est l'Esprit avec ses innombrables ruses qui gouverne le monde ?

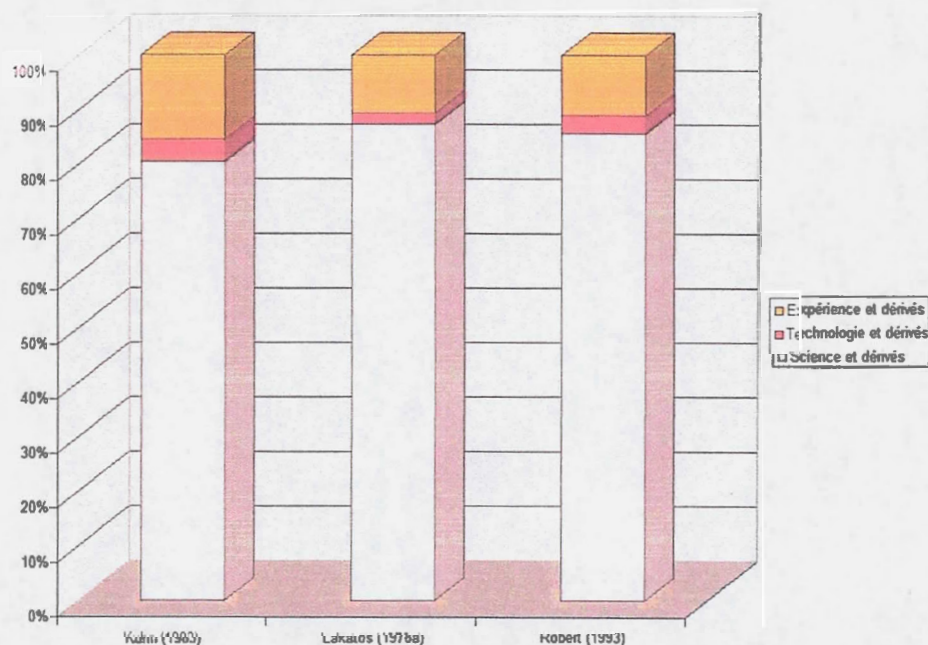


Figure 4.2 : Diagramme lexicographique comparatif de Kuhn (1983), Lakatos (1978a) et Robert (1993), par Guèye.



En tout cas, chez Robert la préséance du théorique sur le technologique et l'expérimental ne fait pas l'ombre d'un doute. Il attribue tous les mérites des « applications techniques » à la science qui selon lui dispose d'une première fonction d'explication des phénomènes connus et de prédictions de ceux qui nous sont encore inconnus ; et, d'une seconde dont le rôle est d'organiser nos comportements futurs et de contribuer à la production de nouvelles technologies. Il décline sa position dès l'entame du premier chapitre de *Mécanismes de la découverte scientifique* en soutenant que :

Depuis la naissance de la philosophie occidentale dans les cités grecques de l'Antiquité, notre civilisation est impliquée dans l'aventure scientifique. Cette entreprise est sûrement la plus déterminante de l'histoire humaine, celle qui a le plus marqué notre manière de vivre. Avec ses différentes applications techniques, la science a radicalement transformé les sociétés humaines, de la vie primitive jusqu'au monde des technologies électroniques que nous connaissons aujourd'hui : la surface de notre planète est désormais profondément modelée par les applications de nos connaissances. En plus des changements physiques, la science amène aussi des transformations cognitives : des mythes préhistoriques à nos croyances scientifiques contemporaines, la science a modifié nos conceptions sur la plupart des sujets. L'évolution de la science entraîne l'abandon progressif de conceptions du monde plus intuitives et leur remplacement par des reconstructions plus systématiques et plus abstraites. (Robert, 1993, p. 1).

Seulement, Robert ne renie pas pour autant la nécessité de l'expérimentation puisque selon lui c'est d'elle que dépend notre degré de croyance. Il soutient qu'« aujourd'hui, ce sont de rigoureux tests expérimentaux qui nous enseignent quel degré de croyance nous devons attribuer à nos hypothèses scientifiques et quand nous devons les remplacer par de meilleures théories. » (Robert, 1993, p. 1). D'un autre côté, il ne dit pas que ce sont nos connaissances qui ont modelé profondément la surface de notre planète, mais bien « les applications de nos connaissances ». Ce qui pourrait nous conforter dans l'idée que Robert est bien conscient des limites d'une vision épurée de la théorie qui ne tiendrait pas compte de son pendant pratique. Cette posture du philosophe correctionniste est bien en adéquation avec sa conception de la science dont il expose les grandes lignes ci-dessous :



La connaissance scientifique a deux fonctions principales : l'explication de faits connus et la prédiction de faits inconnus. En tant qu'ensemble d'explications, la science joue le rôle théorique d'un système du monde ; par ses prédictions, elle a aussi un rôle pratique : elle organise notre comportement futur et elle est appliquée dans la production de nouveaux objets techniques. La science nous est ainsi doublement utile, psychologiquement, par ses explications, et économiquement, par ses prédictions. En tant qu'explication, la science nous rend les faits familiers, elle nous montre ce qui arrive dans le monde comme la simple réalisation de lois préétablies et elle diminue ainsi notre sentiment d'étrangeté à propos de la manière d'être de notre environnement. En tant que prédiction, en rendant possibles des réalisations techniques, elle nous fait produire de nouveaux objets de consommation et plus d'objets de consommation en moins de temps ; elle peut ainsi contribuer à une plus grande satisfaction de nos besoins. (Robert, 1993, p. 1-2).

Cette vision robertienne de la science n'est pas sans rappeler l'approche *top-down* propre à la miniaturisation dont nous avons parlé longuement au chapitre 2, mais aussi à une certaine conception miniaturiste, pourrait-on dire, des nanotechnosciences. Sous la plume de Robert, cette méthode descendante semble perpétuée à travers la détermination de la technologie par la science.

Et pourtant Robert est fasciné par les technologies. En effet, dès 1978, il soutenait dans l'introduction de *Révolutions du savoir* que « les changements radicaux de la connaissance apparaissent d'abord dans la connaissance appliquée, et ce n'est qu'après une certaine mise en œuvre de pratiques cognitives nouvelles que la prise de conscience de tels changements apparaît et permet leur théorisation. » (Robert, 1978, p. 12). Mais, cette reconnaissance partielle de l'origine technologique des théories scientifiques ainsi que leur qualité de source de nouvelles pratiques cognitives susceptibles de favoriser la prise de conscience qui mène à la production des théories capables d'expliquer les réalisations de la connaissance reflète une fois de plus la subordination de tout ce qui relève de la pratique à la théorie. On est loin des « connaissances matérielles » (*thing knowledge*) dont Davis Baird parle en ces termes :

Ailleurs, j'ai plaidé en faveur d'une épistémologie matérialiste que j'appelle « connaissance matérielle ». C'est une épistémologie où les choses que nous faisons portent notre connaissance du monde, sur un pied d'égalité avec les mots que nous prononçons. Il s'agit d'une épistémologie opposée à l'idée que les choses que nous faisons sont uniquement instrumentales à l'articulation et à la justification de la connaissance exprimée en mots ou en équations. Nos choses font pareil, mais elles

font davantage. Elles portent des connaissances elles-mêmes, et assez souvent les mots que nous prononçons servent instrumentalement à l'articulation et à la justification des connaissances portées par les choses. (Davis Baird, 2002a – notre traduction)

Avant de revenir plus tard sur cette approche défendue par Baird et ses collègues, notamment dans la revue *Techné* (volume 6 numéro 2) puis dans un ouvrage paru en 2004 auquel il a donné le même titre que celui de l'article que nous venons de citer. Mais, auparavant terminons notre point sur la technophilie de Robert qui quatorze ans après *Les révolutions du savoir*, lors de son intervention au *Séminaire sur la représentation* organisé par le Centre Interdisciplinaire de Recherche sur l'Apprentissage et le Développement en Éducation (CIRADE) que nous avons déjà cité, s'émerveillait des fabuleux progrès des ordinateurs qui, selon lui, « se sont présentés comme de prodigieuses technologies de l'esprit, c'est-à-dire comme des substituts très efficaces d'activités mentales. » (Robert, 1992, p. 2). Il en voulait pour preuve la réalisation dans ce domaine des programmes informatiques experts qui rendent l'ordinateur capable de faire des diagnostics et de rendre des décisions qui jusqu'à maintenant n'étaient réservées qu'à des experts humains. Ces succès de l'intelligence artificielle ont rendu possibles des diagnostics fiables à partir d'une liste des symptômes du patient grâce à des programmes médicaux experts, tout comme des programmes militaires permettent d'orienter une bombe rien qu'en interagissant avec des données géographiques et météorologiques. Et, comparant ces prouesses technologiques à l'expertise humaine, Robert reconnaît que « le programme expert a même l'avantage de rendre des jugements plus rapides que lui, et également plus sûrs, parce qu'exempts des sources humaines d'erreur, comme la distraction, l'oubli, la fatigue ou le doute. » (Robert, 1992, p. 2.).

Cet enthousiasme de Robert pour les machines ne s'estompe pas avec le temps puisqu'une année plus tard, dans *Les mécanismes de la découverte scientifique*, il soutenait que produire des machines est synonyme d'humaniser la nature, au sens d'un accroissement de l'emprise humaine sur elle. Pour lui, la plupart de nos inventions techniques, qu'il classe à la suite de Sfez (1992) en technologie du corps et en technologie de l'esprit, ont accru notre emprise physique sur la nature, tandis

qu'avec le développement de l'intelligence artificielle, c'est nettement notre emprise mentale sur la nature qui prend de l'importance. Il estime de ce fait qu'en travaillant à connaître les mécanismes de fonctionnement de la connaissance humaine, les sciences cognitives essaient de représenter cette connaissance comme étant semblable au fonctionnement d'une machine. En conséquence de quoi Serge Robert conclut qu'« entre l'humain et son environnement naturel, les sciences cognitives parcourent donc le chemin inverse de l'intelligence artificielle. » (Robert, 1993, p. 239). Partant de là, il parvient à la réflexion ci-dessous susceptible de lui attribuer le mérite d'avoir prédit l'inéluctabilité des technosciences, voire des nanotechnosciences :

En somme, le développement technologique des machines et le progrès théorique des connaissances apparaissent comme le résultat historique de l'interaction complexe entre l'humain et son environnement. On peut alors penser que la distance entre l'intelligence artificielle et les sciences cognitives va désormais progressivement diminuer : l'avenir de l'intelligence artificielle nous donnera des machines qui ressembleront de plus en plus au comportement cognitif humain et les sciences cognitives vont de plus en plus expliquer le fonctionnement de la connaissance humaine comme étant semblable au fonctionnement algorithmique d'une machine. (Robert, 1993, p. 239-240).

Il reste que pour Robert cette association est principalement au bénéfice des sciences cognitives. D'après lui, cette interaction complexe entre sciences cognitives et intelligence artificielle est nécessaire, voire salutaire, et il concède le fait que d'une part les sciences cognitives ne pourraient progresser que si elles postulent qu'il y a dans le fonctionnement mental quelque chose de plus complexe que ce que la nature nous donne à connaître et les machines que nous avons réussies à produire. D'autre part, l'intelligence artificielle ne peut progresser que si elle postule à son tour que ce plus complexe est malgré tout réalisable dans le fonctionnement matériel d'une machine. Il retient que « Cette dialectique méthodologique permet de penser que la fusion de l'intelligence artificielle et des sciences cognitives, ou la réalisation d'une physique de la connaissance, n'est pour la science qu'un idéal régulateur probablement inaccessible. » (Robert, 1993, p. 240).

Une autre façon de poser le débat entre théorie et technologie chez Robert pourrait se ramener à poser la question de savoir si l'ordinateur peut être considéré comme une machine à la fois pensante et cognitive ? Afin de répondre à cette question, le philosophe québécois reviens sur le débat traduit en français dans *Pour la science* en mars 1990 qui a opposé John Searle à Paul Churchland<sup>82</sup> (originellement publié dans la revue *Scientific American*) afin, nous dit-il, de l'approfondir avant de nous soumettre ses nouvelles hypothèses sur la question. Robert commence par exposer la position de Searle qui tente de démontrer que le semblant de connaissance que l'on peut observer dans une machine telle que l'ordinateur n'est qu'un faux-semblant puisque dans le fond celui-ci ne fait que décoder une syntaxe et le classer alors que la connaissance humaine authentique saisit la sémantique bien au-delà de la simple syntaxe. Ainsi, dans l'exemple de la chambre chinoise qu'il met en scène, Searle montre qu'un individu enfermé dans une chambre chinoise, s'il ne connaît que la syntaxe du chinois sans la sémantique, ne connaît pas le chinois et ne le parle pas. L'ordinateur serait donc selon Searle dans la même situation que cet individu. Autrement dit, pour Searle aucun être, humain ou machine, ne saurait se prévaloir de l'attribut « intelligent » s'il n'est capable que de syntaxiser sans jamais sémantiser. Selon lui, en effet, être capable de sémantique suppose pouvoir désirer et croire, conditions intentionnelles *sine qua non* pour la production d'actes de signification. Or, être porteur de désirs et de croyances suppose préalablement, d'après Searle, un cerveau, ou quelque chose d'équivalent, dont un esprit émerge. En conséquence de cette démonstration, étant donné que l'ordinateur quelle que soit sa complexité ne remplit aucun de ces critères, parler d'« intelligence artificielle » serait donc totalement inapproprié et ne serait au mieux qu'un abus de langage.

Paul Churchland en ce qui le concerne s'est opposé à cette position searlienne qu'il trouve trop prétentieuse et trop radicale. Selon lui, personne ne peut considérer l'intelligence artificielle comme impossible *a priori* comme le fait Searle sur la base

---

<sup>82</sup> Voir Searle, John R. 1990. « L'esprit est-il un programme d'ordinateur ? », *Pour la science*, (149), 38-44, ainsi que son ouvrage *Minds, Brains and Science*, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1984, p. 32-35 et Paul Churchland, « Les machines peuvent-elles penser ? », in *Pour la Science*, mars 1990, p. 38-44 et p. 46-53.



du fait que les ordinateurs n'ont été jusqu'ici que des machines syntaxiques et non sémantiques. En effet, pour Churchland, il est parfaitement possible de les rendre sémantiques. L'obstacle à la réalisation de ce projet est le paradigme représentationnaliste qui a servi de cadre à la conception des ordinateurs traditionnels. Selon Churchland, dans une telle optique, l'information ne peut être précisément organisée que comme un système syntaxique. D'où la nécessité d'adopter un nouveau paradigme susceptible de rendre possible l'accomplissement d'actions plus complexes et plus proches de l'activité cognitive humaine. À son avis, le connexionnisme, modèle au sein duquel l'information est organisée selon des réseaux complexes, comparables aux connexions synaptiques qui relient les neurones dans le cerveau humain, ferait l'affaire. De là découle l'optimisme de Churchland quant à la réalisabilité de l'intelligence artificielle. Selon sa vision, on peut bien concevoir que l'individu de la chambre chinoise, peu importe qu'il soit humain ou machine, peut intégrer les fonctions nécessaires à l'interprétation des idéogrammes de sorte qu'à chaque idéogramme pourra être associée une référence, ce qui lui permettra de se réaliser ainsi autant comme une machine sémantique que syntaxique. Churchland déduit de son analyse qu'en plus de savoir associer des idéogrammes entre eux, une telle machine façonnée à l'aide du paradigme connexionniste serait en mesure d'associer des idéogrammes à des événements, des objets, des propriétés, des classes, etc.

À l'issue de cette controverse clairement exposée par Serge Robert, tant dans son article de 1992 que dans son ouvrage de 1993, celui-ci prend le parti de Churchland sur le plan méthodologique pour aborder le champ de l'intelligence artificielle. Car, une telle approche est plus apte à impulser la recherche dans ce domaine en associant le travail du philosophe à celui de l'informaticien que ne le serait celle de Searle qui pourrait nuire à la collaboration entre le philosophe et l'informaticien ainsi qu'au développement de la recherche en intelligence artificielle, du fait qu'il tient leur objectif ultime pour totalement utopique. Du point de vue de Robert, c'est en travaillant à représenter l'activité sémantique combinée aux autres fonctions

cognitives humaines que nous pourrions arriver aux deux résultats possibles suivants susceptibles tous deux de constituer un progrès scientifique :

D'une part, on peut réussir à représenter dans une machine l'activité sémantique, obtenir ainsi une machine technologiquement utile et mieux comprendre en quoi l'activité sémantique réelle est différente de cette représentation. D'autre part, on peut, ce qui apparaît présentement difficilement pensable, compte tenu de mon argumentation pro-Searle, mais pas nécessairement impossible, complexifier la machine au point d'arriver à réaliser l'objectif de Churchland, à intégrer dans la machine une activité sémantique proprement dite, et alors mieux comprendre, à travers l'étude du fonctionnement de cette machine, l'activité cognitive humaine. D'une manière ou de l'autre, le développement de l'intelligence artificielle (qui vise à rendre les machines cognitives) peut donc contribuer au développement d'une science cognitive (qui cherche à expliquer la connaissance humaine comme étant semblable au fonctionnement d'une machine). Si on réussissait à produire une machine vraiment intelligente, on pourrait mieux connaître l'intelligence humaine en étudiant cette machine ; si, au contraire, on ne réussit pas, comme ce fut le cas jusqu'à maintenant, on peut approfondir notre connaissance de l'esprit humain en le contrastant par rapport à la machine, comme Searle a pu le faire et comme je le fais maintenant. En conclusion, le progrès de la technologie informatique comme le progrès de la connaissance épistémologique du fonctionnement de la connaissance humaine exigent d'adopter la position méthodologique de Churchland et de faire comme s'il était possible qu'une machine pense et connaisse. (Robert, 1993, p. 236).

Le choix que fait Robert d'adopter la méthodologie de Churchland est donc de nature purement heuristique. Mais, sa prospective est le fruit d'un raisonnement conditionnel. En effet, ce n'est que si l'on réussit un certain développement de l'intelligence artificielle que cela facilitera l'étude de l'intelligence humaine. Dans le cas contraire, il suggère de procéder comme nous l'avons toujours fait, c'est-à-dire d'approfondir notre connaissance de l'esprit humain en la comparant aux performances de la machine, à l'instar de ce que Searle et lui-même font. Là encore, la dichotomie entre théorie et technologie est maintenue, la seconde continue à servir la première dans une relation de subordination plutôt que d'interaction.

Pourtant, l'une des meilleures façons d'aborder la question nous semble être l'interactionnisme correctionniste élaborée par Robert, mais à condition de lui apporter quelques nouvelles corrections. Pour ce faire, le meilleur angle d'attaque est probablement le holisme à double entrée du concepteur du correctionnisme. Rappelons que, selon cette optique, il existe dans ce programme de recherche quelques règles dynamiques d'interactions des trois plus un ordre épistémique ou

cognitif du langage (descriptif, épistémique, justificatif et métaépistémologique). La première détermination (*bottom-up*) peut être qualifiée d'ascendante puisqu'elle procède des ordres inférieurs aux ordres supérieurs, elle est de nature inductive. Nous en ferions le siège de la technologie. Dans le système robertien, chaque ordre épistémique supérieur peut être considéré comme une généralisation issue de l'ordre immédiatement inférieur. En outre, tout comme les propriétés et les relations primitives de la perception et du langage observationnel s'induisent de la sensation, les définitions des classes du langage scientifique sont induites à partir d'ensembles de propriétés et/ou relations. Enfin, on peut aussi rendre compte des théories métascientifiques de l'épistémologie à partir d'ensembles de théories scientifiques situés à un niveau inférieur.

La seconde détermination (*top-down*) que l'on peut considérer comme l'inverse de la première peut être dite descendante. Elle va des ordres supérieurs vers les ordres inférieurs. Robert la qualifie de déductive. Dans une telle configuration, chaque ordre supérieur structure le contenu d'information que lui fournit l'ordre qui lui est immédiatement inférieur. De ce fait, le discours scientifique organise le descriptif et le discours épistémologique donne le *la* au scientifique. Mais, ces deux types de détermination ne seraient pas complets si l'on ne leur adjoignait pas une latérale, celle rendue possible notamment par l'intervention de l'imaginaire entre l'induction et la déduction. C'est elle qui, par l'usage de l'analogie et de diverses autres figures de rhétorique, recombine entre eux les résultats d'inductions distinctes.

Cette détermination latérale joue un rôle capital dans la créativité à l'œuvre dans la connaissance humaine. Elle est responsable de l'élaboration des classes théoriques de la science empirique et des classes fictives du discours fiction. Elle permet aussi la connaissance des propriétés psychologiques de l'esprit humain. En dernière instance, pour la vision correctionniste, c'est la coprésence des déterminations ascendantes, latérales et descendantes qui fait de la connaissance le résultat d'une activité essentiellement abductive (Robert, 1993, p. 119). Robert précise son modèle ainsi que sa fonction dans les termes suivants :

Cette interaction entre les ordres discursifs va nous amener à comprendre que les relations entre deux ordres immédiatement voisins peuvent être transformées soit par une modification de l'ordre inférieur, soit par une modification de l'ordre supérieur. Il en résulte donc un holisme interactif, où le système total de la connaissance comprend trois niveaux discursifs et est modifiable par deux entrées, une entrée inductive ascendante, qui affecte le contenu de la connaissance, et une entrée déductive descendante, qui en modifie la structure. Enfin, entre les inductions et les déductions, la recombinaison imaginaire peut intervenir et produire, par détermination latérale, de la créativité discursive : en plus d'intervenir sur la mémoire des événements perçus, l'imaginaire peut aussi agir sur chaque ordre discursif et produire des recombinaisons créatives de nature descriptive (comme dans la description d'événements fictifs), explicative (comme dans les hypothèses scientifiques portant sur des entités théoriques) ou justificative (comme dans la formulation de notions épistémologiques complexes). (Robert, 1993, p. 119-120).

Et Robert de poursuivre en soutenant que la « contemporanéité et l'interdépendance » des sensations de ressemblance et de différence l'a amené à soutenir la contemporanéité et l'interdépendance de la perception des propriétés ainsi que celles des relations et la perception des individus. Cela l'a conduit à conclure à la contemporanéité et l'interdépendance du sens et à la référence des expressions du langage observationnel, ou de leur intension et de leur extension, avant de présenter le deuxième ordre épistémique comme étant constitué à partir du premier ordre, d'une part par des inductions intensionnelles, et d'autre part, par des inductions extensionnelles. Du coup, dans la perspective robertienne, le discours scientifique comprend deux types de composantes ayant des fonctions épistémiques distinctes. Il se compose d'abord des définitions générées à partir d'inductions intensionnelles ; puis des hypothèses causales issues d'inductions extensionnelles.

Au terme de cet examen critique de l'interactionnisme correctionniste, nous pensons pouvoir dire que ce serait précisément en ajoutant la technologie dans le jeu ascendant et latéral des déterminismes que l'interactionnisme correctionniste arriverait à se concevoir comme une philosophie technoscientifique digne de ce nom et capable de s'envisager sérieusement comme une « nanophilosophie » capable de prendre en charge les questions inouïes propres aux nanotechnosciences.



### 4.3. Conclusion

Pour finir cette partie, rappelons qu'au second chapitre, nous avons pris le soin de montrer la nature technoscientifique des nanos. Autrement dit, nous avons établi l'enchevêtrement du scientifique et du technologique qui est tel que l'on peut les comparer aux deux faces d'une même pièce de monnaie. Cette caractéristique particulière des nanotechnosciences implique que tout discours sur elles devra tenir compte de leur nature à la fois hybride et transfrontalière.

La condition nécessaire et suffisante d'accessibilité à l'univers nanométrique est matérielle. La manipulabilité et la contrôlabilité des nano-objets dépendent autant de la technologie que de la qualité des théories nanophysiques dont nous disposons actuellement. Ce constat nous a amenés à penser qu'une philosophie des sciences à la hauteur des nouveaux défis posés par ces nouveaux développements de la technoscience n'aura d'autre choix que celui de prendre au sérieux la dimension technologique omniprésente dans le nanomonde.

Ainsi, l'examen des philosophies de Lakatos et de Robert a montré que leurs doctrines respectives, autant que celle de Kuhn, portent sur un portrait figé ou partiel de la science qui nécessiterait une certaine mise à jour. En effet, la science comme l'identité ont ceci de particulier : l'une et l'autre, tout en donnant l'impression d'être inamovibles et éternelles, nourrissent leur environnement tout en s'en nourrissant. Elles revendiquent l'ipséité tout en étant imprégnées d'altérité. Elles sont les incarnations mêmes de la tension parménido-héraclitéenne. Peut-être est-ce de là que vient notre difficulté à les circonscrire ? Quoi qu'il en soit, cette interaction permanente entre la science et le monde, la science et ses propres progrès, a eu un impact sur son évolution et l'a transformée lentement, mais indubitablement au fil des siècles. Elle a même fini par la rendre méconnaissable aux yeux des précurseurs qu'ont été Aristote, Avicenne, Ibn Tufayl, Jâbir ibn Hayyân (Geber), Ibn al-Haytham (Alhazen), Galilée, Boyle et même Newton.

La science de la philosophie des sciences devrait être revisitée de temps à autre à la lumière des évolutions concrètes de la « science » afin de ne point se méprendre ni sur la nature de ce dont elle parle, ni sur sa nature propre. En d'autres termes, la philosophie des sciences non plus n'est pas statique et elle a beaucoup évolué depuis Kant, Reichenbach, Duhem, Schlick, Carnap, Popper, Hanson, Quine et Kuhn, pour ne citer que ceux-là. L'idée que nous défendons ici est celle de son évolution, au moins sous la forme d'une nouvelle branche apte à porter les questions inédites posées par les technosciences et les nanotechnosciences. Le fait est que science et technologie se sont mises à converger davantage de jour en jour donnant naissance à une nouvelle dynamique gnoséologique qui ne laisse plus beaucoup de choix ni à la philosophie des sciences, ni à la philosophie des technologies hormis celui d'en faire autant, c'est-à-dire de converger. Ou alors, elles devront se réinventer si elles ne veulent pas être frappées de caducité.

Il convient tout de même de reconnaître que jusqu'ici les philosophies que nous avons étudiées n'ont pas ignoré la dimension technologique intrinsèque à l'activité scientifique. En vérité, elles ne l'ont jamais perdu de vue. Mais, elles n'ont pas non plus vraiment pris au sérieux la possibilité que la technologie puisse prendre les commandes, ne serait-ce que provisoirement, sauf pour corroborer une théorie ou pour l'aider à en réfuter une autre tout en l'étayant. Or, de notre point de vue, pour qu'une philosophie scientifique soit à la hauteur de la nouvelle dynamique technoscientifique revigorée par l'apparition des nanoscopes, elle ne peut ni ignorer ni sous-traiter la dimension technologique. Et, d'après ce que nous avons vu, même si la corrigibilité de Robert peut permettre de corriger ces problèmes d'un genre nouveau qui s'imposent aux théories métascientifiques, ni lui, ni Lakatos ne remplissent vraiment les conditions qui leur auraient permis de se positionner comme philosophie des nanotechnosciences. L'un des bémols à notre présente conclusion demeure en effet le fait que la philosophie correctionniste pourrait faire figure d'une heuristique intéressante dans la perspective d'un traitement philosophique approprié de toutes ces problématiques.

Mais le plus grand pas vers cette nouvelle approche philosophique nous viendra probablement de Ian Hacking qui a compris depuis longtemps que la représentation présentait de sérieuses lacunes qu'il a décidé de transcender en abordant les choses sous un nouvel angle. Il faut dire que depuis l'énoncé de ses thèses au début des années 1980, un long silence d'une vingtaine d'années s'en est suivi avec quelques rares publications portant sur la question expérimentale en science. C'est cette situation qui inspire à Hans Radder la réflexion suivante dès le début du premier chapitre de *The Philosophy of Scientific Experimentation*, (2003) :

Le développement de la philosophie de l'expérimentation scientifique au cours des vingt dernières années a deux caractéristiques principales. Après un début rapide dans les années 1980 (voir Hacking 1989a), il semble avoir perdu une grande partie de cet élan au cours de la décennie suivante. À tout le moins, l'espoir que l'étude de l'expérience devienne un enjeu majeur dans les traditions héritées de la philosophie des sciences n'est pas satisfait. Pour s'en convaincre, il suffit de parcourir les derniers volumes de revues bien connues, telles que *Philosophy of Science*, *British Journal for philosophy of Science*, *Erkenntnis*, etc. Alternativement, on peut regarder les anthologies récentes, qui pourraient être supposées représenter les valeurs fondamentales de la philosophie actuelle de la science. Par exemple, l'ensemble de six volumes de papiers collectés en philosophie des sciences (Sklar 2000) ne contient pas de contributions qui mettent l'accent sur l'expérimentation. Et dans le volumineux *Companion to Philosophy of Science* (Newton-Smith, 2000), l'analyse explicite de l'expérimentation est presque entièrement limitée à un seul chapitre. Ainsi, le fait que de nombreux scientifiques, peut-être même la majorité d'entre eux, passent la plupart de leur temps à faire des expériences de toutes sortes, ne se reflète pas dans la littérature de référence de la philosophie des sciences. (Radder, 2003, p. 1 (note de traduction)).

Ian Hacking dans un article publié par la *Philosophy of Science Association* en 1989 dessine un tableau moins catégorique que celui dressé par Radder ci-dessus. Il semble, en effet, plus optimiste sur les changements en train de survenir au milieu des années 1980, notamment avec la parution du livre d'Alain Franklin en 1986 sous le titre : *The Neglect of Experiment* que l'on peut traduire par *Le délaissement de l'expérimentation*<sup>83</sup>. Selon Hacking, dans cet ouvrage, il ne s'agissait pas de dire que les scientifiques négligeaient les expériences (*experiments*), et élaboraient des

<sup>83</sup> Ian Hacking. 1988. « *Philosophers of Experiment* » article publié par the Philosophy of Science Association [1989]. Voir aussi la traduction de Marc Lenormand et Anthony Manicki, in *Tracés – Revue de sciences humaines*. Site Internet <http://traces.revues.org/201> [accès le 26/12/2012].

théories complexes à grand renfort de subventions alors même que les laboratoires étaient à l'abandon faute de financement. Mais plutôt que les historiens et les philosophes négligeaient la dimension expérimentale des sciences. Toutefois, il estimait que même si le titre de l'ouvrage était approprié à l'époque où Franklin écrivait, les temps avaient bien changé et que ces assertions de Franklin qui étaient vraies dans le passé ont cessé de l'être vers la fin de cette décennie.

Remontons maintenant à *Representing and Intervening* (1983) dont la version française a donné *Concevoir et expérimenter* (1989) afin de dépasser la représentation pour explorer l'issue possible de l'intervention qui pourrait porter les germes de solutions d'une approche philosophique convenable à l'avènement des nanotechnosciences. Autrement dit, une vision qui tient compte du rôle prégnant de la technologie ainsi que de la nouvelle dimension haptique de l'observation et de la manipulation.



## CHAPITRE V

### REPRÉSENTER ET INTERVENIR OU INTERVENIR ET REPRÉSENTER ?

Une rétrospective rapide de ce que nous avons dit au sujet de Kuhn, Lakatos et Robert au travers de l'analyse de Ian Hacking permettra d'établir le fait que dans toutes ces philosophies des sciences, la représentation prédomine au détriment de l'intervention. La sous-représentation lexicologique de tout ce qui se rapporte à la technologie et à l'instrumentation dans les textes que nous avons étudiés montre bien que dans une large mesure le philosophe canadien a raison de dire que :

L'histoire des sciences de la nature est maintenant presque toujours écrite comme si elle se résumait en une histoire de la théorie. La philosophie des sciences est à ce point devenue une philosophie de la théorie que l'existence même d'observations ou d'expériences préthéorique a été déniée. (Hacking, 1989, p. 246).

Selon lui, en effet, les philosophes des sciences discutent constamment de représentations de la réalité sans quasiment jamais rien dire de l'expérimentation, de la technologie, ou de l'usage de la connaissance dans le but de modifier le monde. Attitude qu'il trouve étrange, selon ses propres mots, puisque pour lui, « méthode expérimentale » est habituellement un autre nom pour dire « méthode scientifique ». D'un autre côté, si l'on en croit Gilbert Hottois, Hacking reproche aux philosophes des sciences leur focalisation sur les théories et leur négligence de l'expérimentation. (Hottois, 2004a, p. 77).

Dans cette dernière étape de notre réflexion, nous ferons le point avec Hacking sur les philosophies à dominante représentationnaliste que nous avons vues et qui, en l'état, sont incompatibles avec les nanotechnosciences avant d'envisager la question sous l'angle interventionniste préconisé par Hacking dans *Representing and*

*Intervening* (1983) que nous citons principalement sous sa traduction française, *Concevoir et expérimenter* (1989). Dès les premières lignes de cet ouvrage, Ian Hacking donne le ton dans l'introduction qu'il consacre à la rationalité. Il y soutient ce qui suit :

Longtemps les philosophes ont fait de la science une momie. Lorsqu'ils se décidèrent enfin à lui ôter ses bandelettes, leur apparurent les restes d'un processus historique où prévalaient découverte et devenir, ils décrétèrent alors, de leur propre chef, qu'il y avait crise de la rationalité. Cet événement eut lieu au début des années soixante. Il s'agissait d'une crise parce que se trouvait soudain bouleversée la vieille conception du savoir scientifique comme couronnement de la raison. (Hacking, 1983, p. 21).

Dans ces propos du philosophe des sciences, la référence à Kuhn est évidente. Mais, avant d'en venir à son examen de la philosophie kuhnienne, intéressons-nous d'abord aux différentes déclinaisons de la représentation, par opposition à l'intervention, envisagées par Hacking, sans perdre de vue le fait que celui-ci a en ligne de mire la question du réalisme qu'il oppose à l'anti-réalisme à laquelle nous n'échapperons pas, mais qui n'est pas l'objet principal de notre présente analyse.

De l'avis de Hacking, la science, dans son sens habituel, poursuit deux objectifs : un premier, théorique et un second, expérimental. Ainsi, selon cette subdivision, les théories tentent de décrire le monde tel qu'il est, alors que l'expérimentation et la technologie qui en découle visent à le transformer. Ceci fait dire à Hacking que « nous représentons et nous intervenons. » Dit autrement, pour le philosophe canadien, « nous représentons pour intervenir et nous intervenons à la lumière de nos représentations. » (Hacking, 1989, p. 64-65). Du coup, il considère que :

Aujourd'hui, l'essentiel du débat sur le réalisme scientifique s'exprime en termes théoriques, de représentation et de vérité. L'ensemble, aussi brillant soit-il, est loin d'emporter l'adhésion. Cela est dû en partie au fait que s'y mêlent des éléments irréductibles de métaphysique. Je soupçonne qu'il est impossible d'émettre un argument décisif pour ou contre le réalisme au niveau de la représentation. Lorsque nous passons de la représentation à l'intervention, en bombardant des billes de niobium avec des positrons par exemple, l'anti-réalisme a moins d'emprise. (...).

En philosophie, le juge ultime n'est pas ce que nous pensons, mais ce que nous faisons. » (Hacking, 1989, p. 64-65).

Nous savons que l'ouvrage de Hacking est un plaidoyer pour le réalisme. Mais, par-delà ce parti pris, nous pensons qu'il offre une analyse intéressante de la question de l'intervention qui, nous l'avons vu, constitue une dimension fondamentale de l'activité nanotechnoscientifique. Avec lui, nous verrons que le point commun entre les différentes théories que nous avons passées en revue à la recherche de la philosophie idéale des nanotechnosciences est la prédominance de la représentation sur l'intervention. À cet égard, elles constituent bien des formes d'idéalisme malgré leurs approches nuancées. Pour mieux comprendre cette assertion, il convient de revenir avec Hacking sur la question de la représentation, notamment sur ce qu'il n'entend pas par ce concept, puis sur le sens qu'il lui donne. Selon Hacking, en effet :

Le mot « représentation » a un lourd passé philosophique. On s'en est servi pour traduire le *Vorstellung* kantien, une chose que l'on place devant l'esprit, un mot qui désigne à la fois des images et des pensées abstraites. Kant avait besoin d'un terme pour remplacer la notion d'« idée » des empiristes anglais et français. Ce que j'entends par « représentation » est exactement l'inverse de l'acception kantienne. Tout ce que j'appelle une représentation est public. On ne peut pas toucher une idée lockienne, mais seul un gardien de musée peut nous empêcher de toucher quelques-unes des premières représentations produites par nos ancêtres. Je ne prétends pas que toutes les représentations peuvent être touchées, mais, au moins, toutes sont publiques. Selon Kant, un jugement est la représentation d'une représentation, la mise devant l'esprit d'une mise devant l'esprit, doublement privé. C'est donc doublement ce que je n'appelle pas une représentation. Mais, pour moi, sont aussi des représentations certains événements qui n'impliquent pourtant que le verbe. Je ne fais pas ici allusion aux simples phrases déclaratives, qui ne sont sûrement pas des représentations, mais plutôt aux spéculations compliquées qui tentent de fournir une représentation de notre monde.

Quand je parle de représentation, c'est d'abord aux objets physiques que je pense : Les figurines, les statues, les images, les gravures, tous les objets qui sont destinés à être examinés, pris en considération. De ces objets nous en trouvons dès l'origine de l'homme. De temps à autre on découvre même des fragments de bois ou de paille promis au pourrissement si quelque événement fortuit ne les avait préservés. Une représentation doit être extérieure et publique, qu'il s'agisse d'un simple graffiti sur un mur ou, en assouplissant le sens du mot « représentation » la théorie la plus sophistiquée sur les forces électromagnétique, gravitationnelle, faible ou forte. Les anciennes représentations qui nous sont parvenues sont le plus souvent visuelles et tactiles. Mais je ne veux rien exclure de ce qui est publiquement accessible aux autres sens. Les appeaux et certains instruments à vent peuvent également être considérés comme produisant des simulacres, même si nous préférons parler d'imitation à leur propos. Je suis sûr qu'une espèce aussi intelligente que l'espèce humaine, même si elle avait été irrévocablement aveugle, se serait tout de même débrouillée avec les représentations tactiles et auditives, car représenter fait partie de notre nature profonde. Mais nous avons des yeux, les premières représentations furent donc visuelles, cependant la représentation n'est pas *a priori* liée à la vue. » (Hacking, 1989, p. 221-222)



Une des conséquences de ce parti pris est qu'Hacking se voit obligé de s'expliquer sur les différences entre ce qui relève de la représentation et ce qui n'en relève pas. À cet effet, il évoque d'abord William James dont il dit qu'il se moquait de ce qu'il appelait la théorie de la vérité comme copie, parfois appelée théorie de la vérité-correspondance. Selon celle-ci, une théorie est vraie si elle est la réplique exacte de ce qui la rend vraie, peu importe sa nature. Puis, Hacking se réfère à ce qu'il considère comme une erreur de Wittgenstein qui, présentant une théorie de la vérité comme image (une autre forme de vérité-correspondance) dans le *Tractacus*, postule qu'une phrase est vraie quand elle donne une image précise des faits. En effet, pour le philosophe du Collège de France, les phrases simples ne sont ni des images, ni des copies, ni des représentations. Pour lui :

Parler de représentation en philosophie invite inmanquablement à évoquer les *Sätze* de Wittgenstein. Oublions-les. La phrase : « Le chat est sur la natte » n'est pas une représentation de la réalité. Comme Wittgenstein nous l'a lui-même appris, cette phrase peut être utilisée pour toutes sortes de propos dont aucun n'est destiné à faire le portrait du monde tel qu'il est. Mais les théories électromagnétiques de Maxwell avaient bien pour objectif de représenter le monde, de le décrire tel qu'il est. Les théories, et non les phrases individuelles, sont des représentations.

Certains philosophes, réalisant que les phrases ne sont pas des représentations, en concluent que l'idée même de représentation est sans valeur pour la philosophie. C'est une erreur. Pour représenter, on peut se servir d'un ensemble de phrases imbriquées. C'est ainsi que fonctionne la langue anglaise ordinaire. Un avocat peut représenter son client et se représenter que la police a mal fait son travail en établissant son rapport. Une phrase ne peut, en général, à elle seule représenter. Une représentation peut être seulement verbale, mais elle utilisera alors abondamment le verbe. (Hacking, 1989, p. 223).

En fait, pour Hacking, la sur-représentation de la représentation dans les sciences est une chose assez récente puisqu'aux débuts de la science moderne, la révolution scientifique fut l'occasion de l'apparition de nouvelles institutions. Ainsi furent fondées des académies des sciences dont l'une des premières, après celle considérée comme la toute première qui a été fondée à Naples en 1560 par Giovanni Battista Della Porta, qui portait le nom d'*Academia Secretorum Naturae* (l'académie des secrets de la nature) et dont les membres devaient avoir présenté un fait nouveau dans les sciences naturelles pour être acceptés, fut l'Académie des Lynx (*Accademia nazionale dei Lincei*) fondée en le 17 août 1603 à Rome par le jeune prince Federico



Cesi âgé de dix-huit ans à l'époque, fils du marquis de Monticelli et issu d'une famille de cinq cardinaux, l'érudit mathématicien, Francesco Stelluti, le médecin et naturaliste hollandais, Johannes van Heeck, et l'astronome Anastasio de Filiis. Puis, il y en eut bien d'autres encore comme l'*Académie allemande des sciences Leopoldina* (1652) et *La Société Royale*, fondées à Londres autour de 1660. De l'avis de Hacking, c'est cette dernière qui servit de modèle aux académies nationales fondées à Paris, Saint-Pétersbourg et Berlin. C'est ainsi que naquit une nouvelle forme de communication matérialisée par le journal scientifique. Selon lui, cependant, les premières pages des *Philosophical Transactions of the Royal Society* avaient une allure surprenante puisque publiée sous forme de bulletin imprimé regroupant plusieurs communications adressées à la *Royal Society*. Dans les différents numéros publiés, même si les mathématiques et la théorie y occupaient une bonne place, il y était proposé aussi des chroniques de faits, d'observations, d'expériences et de déductions opérées à partir d'expériences. C'est ainsi, rapporte Hacking, que « des rapports sur les monstres marins ou sur le climat des îles Hébrides y côtoient les travaux mémorables de gens comme Robert Boyle ou Robert Hooke. » (Hacking, 1989, p. 246). C'est pourquoi soutient-il, ni Boyle ni Hooke ne pouvaient concevoir de s'adresser à la Société sans faire la démonstration devant leurs pairs rassemblés de quelque appareil ou phénomène expérimental nouveau.

Mais, déplore-t-il, bien loin est ce temps-là, puisque de nos jours, l'histoire des sciences de la nature est presque toujours écrite comme si elle se résumait en une histoire de la théorie. Aussi dira-t-il, « la philosophie des sciences est à ce point devenue une philosophie de la théorie que l'existence même d'observations ou d'expériences préthéoriques a été déniée. » (Hacking, 1989, p. 246). Fort de ce constat, le philosophe de l'intervention préconise un « retour à Bacon » qui, de son avis, se préoccupait plus sérieusement des sciences expérimentales. Car, pour lui, l'expérimentation a sa vie propre. (Hacking, 1989, p. 246). En ce qui nous concerne ici, notre étude cherche plus humblement à mesurer la place de la dimension

technologique de l'instrumentation et de l'expérimentation dans les philosophies des sciences qui pourraient avoir les nanos comme objet.

Reconnaissant à Dewey la paternité des fondements de son réalisme qui consiste à intervenir dans le monde plutôt qu'à le représenter verbalement, Hacking concède qu'il lui doit aussi l'idée selon laquelle la vérité est ce qui est acceptable et prouvé. Selon le Dewey de Hacking, en effet, le langage est un instrument qui nous permet de donner forme à nos expériences en fonction de nos objectifs. De ce fait, le monde tel qu'envisagé par Dewey et la représentation que nous nous en faisons, ne sont que simples constructions sociales. Il détestait aussi les dualismes du genre, esprit/matière, théorie/pratique, pensée/action, fait/valeur et se moquait de ceux qu'il appelait les « spectateurs de la connaissance ». Ces derniers seraient, selon lui, cette « classe oisive qui pense et écrit la philosophie et qu'il oppose à une classe laborieuse d'entrepreneurs et de travailleurs qui ne peuvent se contenter de regarder. » (Hacking, 1989, p. 113). De la représentation à l'intervention, comme le remarque si bien Sacha Loeve (thèse, 2009, p. 466), on est passé de la microscopie en champ lointain à la microscopie en champ proche. Ce changement de perspective n'est pas anodin puisqu'il implique un bouleversement sans précédent de notre relation au monde. En effet, dit-il :

Avec les microscopies en champ lointain comme avec les méthodes de spectroscopie, on reste dans le cadre jadis formé par et pour l'iconographie religieuse et la représentation en peinture : le jeu iconique entre la représentation et la trace. Pour parler comme Charles Sanders Pierce – fondateur de la sémiotique –, le signe opère toujours dans un jeu entre *l'indice* (trace directe, stigmat ou symptôme) et *l'icône* (image qui désigne l'objet par ressemblance) ; enfin ce jeu de l'indice et de l'icône, pour être signifiant, doit être interprété à la lumière du *symbole*, socialement institué. Autrement dit ce n'est que par le symbole, tiers signifiant pour une communauté, que l'icône, éventuellement soutenue par des indices qui recueillent la trace des choses, fait sens. La dimension symbolique inclut la correction, le contrôle ou la rectification par autrui, comme dans l'épistémologie bachelardienne. (Loeve, 2009, p. 466).

Selon L'interprétation de Loeve, à l'image de la Sainte Trinité, indice, icône et symbole fonctionnent ensemble et n'ont qu'un ennemi : l'idole. Pour lui, l'icône ne peut prétendre donner entièrement l'objet auquel elle serait rattachée par quelques stigmates physiques au risque de n'être qu'une idole. Il semble en effet que c'est

l'idée selon laquelle les icônes étaient devenues des idoles qui fut à l'origine de la querelle de l'iconoclasme, ce qui impliquerait qu'il faille prendre ses distances pour connaître. Selon Loeve, c'est cela que redécouvrait la grammaire de l'image élaborée par Peirce puisque dans le régime traditionnel de l'image, l'activité de connaissance implique un usage puritain des images.

Selon le sémiologue Patrick Pajon appelé en renfort par Loeve, les nouvelles images nanométriques par contre ne permettent plus de distinguer entre les trois catégories sémiotiques mobilisées par Pierce, en l'occurrence « l'indice (trace d'un phénomène physique) ; l'icône (ressemblance) ; le symbole (signification sociale). » Lorsqu'il est question de nano-images, Pajon note que ces trois niveaux se présentent bien souvent confondus, collés et rabattus sur l'objet. (Loeve, 2009, p. 466). D'où l'idée qu'avec les nanos, l'image a changé de nature, comme nous l'avons déjà vu d'ailleurs au point 2.4.1.1 que nous avons intitulé « Objectivité et image ». C'est dans la même optique que Loeve présente l'image comme quelque chose qui a mutée, un outil prothèse de l'action, plus qu'un instrument, une prothèse de la perception puisque « c'est souvent la même pointe d'AFM ou de STM qui est utilisée pour déplacer des objets nanométriques, déclencher un phénomène et imager le déplacement, rendre visible l'effet de l'intervention ou le déclenchement d'un phénomène. Les nano-images sont ainsi faites, non plus pour rester fixes, mais pour être utilisées ou manipulées. Elles ont désormais une propriété interactive, faite, toujours selon Sacha Loeve, pour être coupées, copiées, collées, tournées, triturées, corrélées, colorées, annotées, etc. La perception s'y donne d'emblée comme une action sur ce qui est perçu. Toutes ces considérations font dire à Loeve que l'image a perdu toute innocence et ne se limite plus à être la trace d'une intervention, mais elle invite à prolonger un processus spontané par une intervention, ou inversement, à prolonger l'intervention par le processus que celle-ci a déclenché. Loeve en conclut que « l'image résulte d'une action, signe une action et fait signe vers une capacité d'action. » (Loeve, 2009, p. 468). Il remarque aussi non sans raison que :



Chez l'épistémologue Ian Hacking, la représentation s'accompagne toujours de l'intervention ; réciproquement, l'intervention fournit des bases solides à un réalisme épistémologique sous-tendant la représentation. Cependant, ces pratiques ont fait plus que confirmer l'épistémologie de Hacking. Comme le disent Daston et Galison, (...), elles ont dépassé les termes dans lesquels elle se formulait pour trancher en faveur de l'intervention. (Loeve, 2009, p. 468).

Daston et Galison soutiennent en effet, dans cet ouvrage évoqué par Loeve que nous avons eu l'occasion d'étudier au chapitre II, que la nanomanipulation a fini de donner raison à Ian Hacking. En effet, disent-ils :

Comme l'a bien vu Hacking au début des années 1980, la longue histoire de la représentation scientifique – les tracés, les dessins, les croquis et même les photographies – était vouée à l'échec. On n'empêchera jamais personne d'inventer une raison plausible de traiter la réalité des objets comme une simple hypothèse ou fiction utile. Hacking, après Bacon, soutenait que seul l'usage était de nature à fonder un réalisme robuste. C'était un pavé dans la mare du vieux débat sur la réalité des objets scientifiques. Du côté de la représentation : doit être tenu pour réel ce qui fournit les meilleures explications. Du côté de l'intervention : doit être admis comme réel ce qui est le plus efficace.

Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, la nanomanipulation, au croisement de la science et de l'ingénierie, éluda la vieille alternative entre représentation et intervention. Les spécialistes de physique des particules, de chimie des surfaces et de biologie cellulaire commencèrent à faire cause commune avec les ingénieurs électriques. Le but de cette entreprise hybride n'était pas de prouver l'existence ou la non existence d'entités particulières. De ce point de vue, leur travail n'était plus de même nature que celui des physiciens des particules élémentaires, consistant à établir la réalité de courants neutres, de positrons, du méson oméga ou du boson de Higgs. (Daston et Galison, 2012, p. 451).

Avant de nous intéresser à la conception interventionniste de Hacking tel qu'il le présente lui-même, revenons rapidement sur les philosophies de Kuhn, Lakatos et Robert, par ricochet, au travers des yeux du philosophe réaliste puis sur sa critique du représentationnalisme afin de mieux comprendre la nature des limites qui leur empêchent de prétendre sérieusement au titre de philosophie des nanotechnosciences.



## 5.1. De la science qui représente...

### 5.1.1. Le représentationnalisme de Kuhn vu par Hacking

Selon l'interprétation que Hacking fait de la pensée de Kuhn, la thèse de la « science normale », que nous avons passé en revue au sous-chapitre 3.1 consacrée à la théorie des paradigmes, est une branche de la science normale qui, une fois bien établie ne s'oppose plus souvent à la théorie en vigueur. Alors qu'elle se contente de résoudre des énigmes, la théorie en revanche s'avère incapable d'entrer en contact avec les faits. Dans cette conception kuhnienne de la science, les failles dans le cadre d'une théorie adoptée par une communauté scientifique se déclinent sous le nom d'« anomalies ». Ces dernières peuvent faire l'objet de modifications qui pourraient amender la théorie, lui permettant ainsi de rendre compte des objections mineures qui lui sont faites tout en réfutant les objections qui lui étaient adressées. Quant à la science normale, une partie de ses activités consiste à articuler mathématiquement les théories, afin de les rendre plus intelligibles avec des conséquences évidentes et complexes surtout dans ses rapports avec la réalité. Ainsi, alors qu'une partie importante de cette science normale se consacre aux applications technologiques, une autre élabore et clarifie expérimentalement les faits mis en cause par la théorie, alors qu'une dernière partie affine les mesures quantitatives que la théorie tient pour importantes. Toujours selon Hacking, souvent l'objectif de la science normale consiste seulement à obtenir un nombre précis de la manière la plus astucieuse possible, mais cette opération n'est pas destinée à vérifier ou à confirmer la théorie. Car, la science normale ne s'occupe malheureusement pas de confirmer, de vérifier, de falsifier des hypothèses ou d'en réfuter même si dans certains domaines elle s'avère capable de constituer un corps de connaissances et de concepts vraiment solide. (Hacking, 1989, p. 31).

On sait que les travaux de Kuhn furent suivis d'une crise de la rationalité dont Hacking dit que l'auteur lui-même fut surpris. En effet, il semble qu'il a admis n'avoir jamais eu l'intention de mettre en cause les vertus coutumières des théories

scientifiques. Si l'on en croit Hacking, il définissait cinq principes caractéristiques des théories scientifiques. Il s'agit notamment de la précision en terme d'ajustement aux données expérimentales, de la cohérence interne et externe, de la grande portée avec de riches conséquences, de la simplicité de sa structure impliquant l'intelligibilité des faits, puis de la fécondité susceptible de produire des faits, techniques et relations nouvelles. Le philosophe canadien envisage même dans cette optique de Kuhn un sixième principe dont l'opportunité d'application se présente rarement, mais qui permettrait, dans le cadre de la science normale, que soit menée une expérience cruciale destinée à départager deux théories rivales partageant le même appareil conceptuel. Hacking complète son propos avec le commentaire suivant :

Ces principes semblent peu conformes à l'image de l'auteur de *la Structure des révolutions scientifiques*. Mais Kuhn ne s'en tient pas là, il ajoute à cet exposé deux remarques fondamentales. Celle-ci d'abord : Quand vient le moment de choisir entre deux théories rivales, les cinq principes ci-dessus exposés, et d'autres du même type ne sont jamais suffisants. D'autres qualités de jugement entrent en jeu, des qualités pour lesquelles aucune formalisation algorithmique n'est a priori possible. Celle-là ensuite : J'ai fait remarquer que, d'une théorie à l'autre, on ne parle pas le même langage... J'entends seulement indiquer par là qu'il existe des limites, non négligeables, à ce que l'auteur d'une théorie peut communiquer à l'auteur d'une autre théorie. Cependant, en dépit du caractère partiel de leur communication, les auteurs des diverses théories peuvent échanger, pas toujours facilement d'ailleurs, les résultats techniques concrets qui résultent de leurs théories (2).

Lorsqu'on commence à croire en la vérité d'une théorie, insiste Kuhn, « on finit par parler sa langue comme la sienne propre. On n'a jamais eu le choix ». Mais, choix ou pas, reste que l'on ne peut porter en soi deux théories et les comparer terme à terme, elles diffèrent trop pour cela. On se convertit petit à petit et le changement de communauté de langage est le signe de cette conversion. (Hacking, 1989, p. 40).

Pour Hacking, la contribution de Kuhn a consisté entre autres à changer radicalement ce présupposé du nominaliste strict qui consiste à penser que nos systèmes de classification sont le produit de l'esprit sans prendre en compte le fait que ces systèmes pourraient subir de profondes transformations. De son point de vue, nous sommes des réalistes empiriques qui faisons comme si nous avions affaire à des espèces naturelles, des principes réels de catégorisation, alors que l'histoire nous enseigne que bon nombre des études qui nous étaient le plus chères ont fini à leur tour par être remplacées. Les catégories changent souvent et il est difficile de

concevoir le monde hors des systèmes d'analyse, des problématiques, des méthodes technologiques et d'apprentissage actuellement en vigueur. Hacking en déduit donc, qu'à l'égard de la nature, nous procédons comme si celle-ci était divisée en catégories, conformément à la manière dont les sciences nous l'enseignent aujourd'hui. La vision inouïe, favorisée par la théorie des paradigmes quant à nos systèmes de classification non permanente, a contribué à faire disparaître l'idée d'une seule et unique représentation vraie et permanente du monde. (Hacking, 1989, p. 187).

Un autre apport concédé par Hacking à Kuhn se rapporte au calcul. En effet, fait-il remarquer, la science normale est question d'articulation puisque la théorie, si elle tient à avoir une bonne prise sur le monde et se prêter à la vérification expérimentale, doit être articulée. Comme l'exprime Hacking lui-même :

La théorie doit être articulée pour avoir meilleure prise sur le monde et s'ouvrir à la vérification expérimentale. Dans un premier temps, la plupart des spéculations ont beaucoup de mal à avoir prise sur le monde. Il y a deux raisons à cela. Il est rare d'abord que l'on puisse immédiatement déduire d'une spéculation des conséquences qui soient, même en principe, vérifiables. Ensuite, il arrive souvent que l'on ne puisse vérifier une proposition, pourtant vérifiable en principe, simplement parce que personne ne sait comment procéder aux essais. De nouvelles idées expérimentales, de nouvelles technologies sont nécessaires. Dans l'exemple de Herschel et de la chaleur rayonnante, le thermocouple et les idées de Macedonio Melloni furent nécessaires pour que les spéculations initiales de Herschel puissent être approfondies. (Hacking, 1989, p. 345).

En conséquence, l'articulation de Kuhn recouvre deux opérations distinctes. La première est l'articulation de la théorie ; et la seconde serait l'articulation de l'expérience. Hacking choisit d'appeler celle qu'il considère comme étant la plus théorique des deux « calculs », entendant par-là « l'altération mathématique d'une hypothèse donnée qui se trouve ainsi en résonance plus intime avec le monde. » (Hacking, 1989, p. 345).

D'autre part, il considère que même si Kuhn n'est pas un sociologue empirique, il est dans une certaine mesure, ce qu'il appelle, « un sociologue spéculatif de l'ancienne école » en plus de se rapprocher des fonctionnalistes. Ces derniers se



distinguent par une approche spécifique qui consiste, après la découverte de pratiques propres à une société ou une sous-culture, à s'intéresser en priorité à la manière dont celles-ci pouvaient se maintenir plutôt qu'à la question de leur origine. Ils postulaient ainsi que, des diverses pratiques d'un groupe, celles douées de vertus susceptibles de contribuer à préserver la société dans son ensemble, constituent la fonction de cette pratique. C'est cette dernière (la fonction de la pratique) qui permet de comprendre les pratiques en question. Ainsi, Kuhn, à l'instar des fonctionnalistes, constatant que la mesure jouait un rôle de plus en plus important en physique, suggère que ce n'est qu'à partir de 1840 que la mathématisation se généralise. Mais, plutôt que de se demander comment cela s'est produit, il préfère s'interroger sur la raison de sa perpétuation. Toutefois, nous dit Hacking :

Les cyniques pourraient suggérer que mesurer occupe les scientifiques. Kuhn dit que les anomalies qui adviennent inévitablement dans un ensemble de mesures précises permettent de déterminer l'activité qui doit être entreprise, même si la science est alors en « crise ». Elles permettent également de vérifier le bien-fondé de la théorie qui prétend supplanter la précédente. Ainsi, les mesures jouent un rôle important dans la chaîne science normale-crise-révolution-nouvelle science normale que Kuhn propose. (Hacking, 1989, p. 393).

Parmi les vives réactions des philosophes des sciences aux thèses de Kuhn, celles de Feyerabend et de Lakatos ont été commentées par Hacking qui estime que contrairement au premier, le théoricien des paradigmes ne se risque jamais à polémiquer avec le rationalisme scientifique. Le second, quant à lui, afin de revigorer le rationalisme ébranlé par la théorie audacieuse de l'auteur de *La structure des révolutions scientifiques*, a essayé, selon Hacking, de le battre sur son propre terrain. Aussi, propose-t-il, comme nous l'avons vu dans le chapitre qui lui est consacré dans cette étude, un retour à Popper. En effet, accusant Kuhn de faire de la « psychologie de masse », il prône un retour critique à Popper en inventant la « méthodologie des programmes de recherche scientifique » qui, au demeurant, ne sera pas véritablement une réfutation des thèses défendues par son collègue, mais plutôt l'occasion pour lui de développer une vision alternative et rationaliste de la science.



En définitive, Hacking, avant d'en venir plus amplement à la philosophie de Lakatos que nous allons revoir rapidement sous l'angle qui est le sien, conclut son chapitre sur Kuhn en faisant le constat selon lequel nous sommes vraiment devenus des historicistes comme l'illustrent les fondements mêmes de la belle analyse que Larry Laudan (1977) fait de l'état de la rationalité. En effet, de l'examen de Hacking, il ressort que Laudan ne tire ses conclusions que des « preuves historiques disponibles » puisque de toute façon, depuis l'invention de la science normale, le discours de la philosophie des sciences a radicalement changé. Ainsi que le prétend le philosophe de l'intervention : « Il ne nous arrivera plus de déshistoriser la science pour lui prouver notre respect, comme nous le reprochait Nietzsche. » (Hacking, 1989, p. 44). Toutefois, cette marque indélébile apposée par la philosophie des révolutions scientifiques sur la philosophie des sciences n'enlève en rien le fait constant que son auteur demeure plus en faveur de la théorie que de l'expérimentation, comme nous l'avons démontré du reste au chapitre III (« Théorie des paradigmes et nanotechnosciences ») de ce présent essai. Dans le but d'illustrer son propos, Hacking relate le fait suivant :

Fritz London (1900-1953) était un remarquable théoricien, spécialiste de la physique des basses températures. Dans le même domaine, Heinz London (1907-1970) se consacrait surtout à l'expérimentation. Ensemble, les deux frères formaient une équipe remarquable. La biographie de Fritz fut favorablement accueillie dans le *Dictionary*, mais celle de Heinz dut être abrégée. Le responsable de la publication (Kuhn en l'occurrence) fit ainsi preuve de l'habituel préjugé en faveur de la théorie, au détriment de l'expérience. (Hacking, 1989, p. 249).

C'est bien pour toutes ces raisons que Ian Hacking, plutôt que d'étudier l'histoire, se propose de se servir des exemples historiques pour prendre des leçons et considérer comme acquis le fait « que le savoir lui-même est une entité qui évolue au cours de l'histoire. » Plutôt que d'en avoir une conception représentationnaliste, il préfère en adopter une qui considère l'histoire, non pas comme ce que nous pensons, mais bien comme ce que nous faisons. De son avis, « ce n'est pas l'histoire des idées qui importe mais l'histoire tout court. » (Hacking, 1989, p. 45-46). Du coup, sa conception de la réalité va s'en ressentir, puisque, comme il le soutient, la distinction qu'il établit entre la raison et la réalité est plus profonde que celle de Laudan et de

Putnam, parce qu'il « considère que la réalité dépend plus de ce que l'on fait que de ce que l'on pense. » (Hacking, 1989, p. 46).

Ces postulats mènent le philosophe canadien à un réalisme fondé par l'action puisqu'il reconnaît que ce ne sont pas les quarks qui l'ont converti au réalisme, mais plutôt l'existence d'émetteurs de haute précision conçus pour projeter des positrons et des électrons qui s'exécutent à merveille. Ce qui signifie pour lui que l'on comprend les effets et les causes puis l'on s'en sert pour découvrir d'autres choses. « Cela s'applique aussi, bien sûr, à la plupart des outils de ce genre, les dispositions permettant de maintenir la bille de niobium à très basse température et tous ces innombrables outils qui éprouvent le "théorique". » (Hacking, 1989, p. 53-54). Autrement dit, c'est l'émergence d'une technologie appropriée qui a converti Hacking au réalisme et son projet clairement formulé à travers *Representing and Intervening* (1983) est de nous entraîner loin du réalisme à propos des théories, en direction du réalisme à propos des entités, en l'occurrence celles qui sont utiles au travail expérimental, ce qui aura pour effet de nous éloigner de la représentation en nous rapprochant de l'intervention. (Hacking, 1989, p. 62).

### 5.1.2. Lakatos vu par Hacking

Passons maintenant à la lecture que fait Hacking des thèses de Lakatos et par ricochet, *mutatis mutandis*, de celles Robert dont nous avons vu au chapitre IV en quoi elle était héritière du falsificationnisme sophistiqué du Magyar, et dans quelle mesure le professeur de l'UQÀM s'en démarque à travers l'invention de la théorie du correctionnisme qui constitue, de *facto*, une falsification de la méthodologie des programmes de recherche qui l'inspire et une correction de ses erreurs.

Revenant tour à tour sur ses thèmes de prédilections de Lakatos, tels que l'histoire, la méthodologie, le noyau et la ceinture de protection, le progrès et la dégénérescence, la croissance du savoir, l'évaluation des théories scientifiques, l'observation et l'idée de charge théorique, Hacking en fait une critique succincte en

montrant que d'une certaine façon, à l'instar de Kuhn, la philosophie de Lakatos reste dominée par la théorie au détriment des dimensions technologique, instrumentale et expérimentale.

Nous avons rappelé brièvement plus haut la critique que fait Lakatos à Kuhn. « C'est de la psychologie de masse », disait-il. Seulement, de l'avis de Hacking, même si les critiques de Lakatos travestissent la pensée de Kuhn, elles n'en demeurent pas moins intéressantes. En effet, alors que la conception de la méthode ou de la logique de la découverte scientifique comme discipline d'évaluation rationnelle des théories et des critères de progrès scientifiques est en voie de disparition, il est encore possible d'essayer d'expliquer les changements de paradigmes en termes de psychologie sociale comme le fait Kuhn. Pour Hacking, Lakatos, considérant que cette tentative ne laisse aucune place aux valeurs scientifiques de vérité, d'objectivité, de rationalité et de raison, s'y oppose vigoureusement en la qualifiant de tentative de réduire la philosophie des sciences à la sociologie.

Néanmoins, comme le fait remarquer Hacking, les deux questions que sont la rationalité combinée à la vérité et la réalité qui sont à l'ordre du jour en philosophie des sciences sont d'ordre épistémologique et métaphysique. Toutefois, même si Lakatos donne l'impression de ne s'intéresser qu'à la première, ses préoccupations relèvent essentiellement de l'ordre de la seconde, même si de fait, le thuriféraire dissident de Popper est universellement connu pour avoir produit une nouvelle théorie de la méthode et de la raison. Selon Hacking :

Si cette opinion est justifiée, alors la théorie de la rationalité de Lakatos est bizarre. Elle ne nous aide pas du tout à décider de ce qu'il serait raisonnable de croire ou de faire maintenant. Elle est entièrement tournée vers le passé. Elle peut nous indiquer quelles décisions scientifiques furent rationnelles, mais elle ne nous dit rien sur le futur. Tout ce qui porte sur ce sujet chez Lakatos est un mélange de platitudes et de préjugés. Ses textes n'en sont pas moins captivants. (Hacking, 1989, p. 190).

Sur la base de cette critique Hacking suggère que son véritable propos n'est ni la méthode ni la rationalité, mais bien la métaphysique et non l'épistémologie puisque

son intérêt porte principalement sur l'absence de la vérité. Pour Hacking, de sa conception de la proposition scientifique comme expression des choses comme elles sont découle l'idée que celle-ci doit en conséquence correspondre à la vérité, garantissant ainsi l'objectivité de la science. D'où l'adoption par Lakatos de la science comme modèle d'objectivité par excellence. Sur ce, Hacking s'autorisera le commentaire suivant :

Pour Lakatos, formé en Hongrie dans la tradition hégélienne et marxiste, la démolition post-kantienne, hégélienne, de la théorie de la correspondance va de soi. En cela il se rapproche de Peirce, également formé dans la matrice hégélienne et qui, comme tant d'autres pragmatistes, n'avait que faire de ce que William James appelait la théorie de la vérité comme copie. (Hacking, 1989, p. 190).

Abordant la question de l'histoire des méthodologies, Hacking suspecte Lakatos d'avoir développé des lieux communs de l'époque sans éprouver le besoin de les expliquer convenablement. Il semble, en effet, qu'il présente sa philosophie comme le produit d'un autre courant dont quelques-uns des thèmes principaux sont la révolution et la rationalité. En parcourant l'histoire de ces thèmes, Hacking tente de montrer qu'au fond, un certain nombre de ces assertions périphériques dans la philosophie des programmes de recherche était très répandu au sein de la communauté des philosophes des sciences dès 1965. Selon lui, il s'agissait d'opinions qualifiées de simplistes qui prétendaient, par exemple, qu'il n'y a, en principe, aucune différence entre l'énoncé d'une théorie et les rapports d'observation, qu'il n'y a pas d'expérience cruciale, qu'il est toujours possible de formuler des hypothèses auxiliaires pour sauver une théorie et qu'il ne fallait abandonner une théorie que lorsque l'on pouvait la remplacer par une meilleure. La critique qu'adresse Hacking à Lakatos à ce sujet est que ce dernier ne fournit pas d'explications satisfaisantes de ces propositions. À son avis, celles-ci sont généralement issues d'une philosophie considérée comme inféodée à la théorie que la réflexion qu'il va avoir sur l'expérimentation, et qui fera l'objet de notre prochain sous-chapitre, permettra de revoir ou de réfuter.



Toujours sur ce terrain menant à la méthodologie, considérant le modèle euclidien et l'inductivisme, Lakatos estime, semble-t-il, qu'à l'origine le modèle de la vraie science par excellence fut la preuve mathématique. De ce fait, les conclusions devaient être démontrées et rendues absolument certaines et tout ce dont on ne pouvait entièrement s'assurer était considéré comme défectueux, ce qui donnait à la science un caractère infaillible (Hacking, 1989, p. 192). Au XVII<sup>e</sup> siècle la réalisation de cet idéal se réduisit en peau de chagrin du fait de l'avènement d'une nouvelle méthode de raisonnement basée sur l'expérience. Pour Hacking, on dirait que l'histoire se répète chaque fois que nous passons de la déduction à l'induction, comme si ne pouvant être complètement sûrs de ce que nous savons, nous cherchons à nous assurer des fondements de ce savoir qui devraient être fournis par l'observation méthodique. Ainsi généralise-t-on à partir d'expériences éprouvées, avant d'établir des analogies qui permettent de tirer des conclusions scientifiques. De ce fait, la variété des observations étayant la conclusion, leur multiplication et leur répétabilité jouent en faveur de la probabilité de nos résultats. Si l'on en croit Hacking, cette démarche ne permet, certes, pas d'avoir des certitudes, mais nous laisse tout de même avec de hautes probabilités. Aussi dira-t-il sur ce point :

Voici au moins deux étapes sur la grande route menant à la méthodologie : preuve et probabilité. Hume, connaissant les échecs subis par la première, commença dès 1739 à douter de la seconde. Des faits particuliers ne peuvent en aucun cas servir de « bonnes raisons » pour croire en des déclarations ou des énoncés plus généraux concernant le futur. Popper est d'accord avec ces idées et Lakatos aussi. (Hacking, 1989, p. 192).

Prolongeant sa réflexion sur le Magyar, Hacking lui reproche de sous-estimer certains aspects de la méthodologie et de trop s'étendre sur d'autres. Sur les trois Popper qu'il nous propose (Popper<sub>1</sub>, Popper<sub>2</sub>, Popper<sub>3</sub>) et qui tous insistent sur l'essai et la confirmation plutôt que sur la vérification et la confirmation, pour le philosophe de l'intervention, chacun d'eux correspondrait à une version plus sophistiquée de ce qu'il aurait appris de Popper. Selon lui, cette conception n'est rien d'autre qu'une manière de dire que « l'homme propose et la nature dispose ». Autrement dit, nous nous chargeons d'élaborer des théories que la nature valide ou

invalide selon le cas. D'où la différence assez sensible entre théories faillibles et observations fondamentales de la nature puisque ces dernières jouent un rôle comparable à celui d'une cour d'appel, dont les jugements sont définitifs et irrévocables après les vérifications qui s'imposent. Ainsi, une théorie qui ne coïncide pas avec l'observation devra être abandonnée. Hacking renchérit en soutenant que :

Cette histoire de conjecture et de réfutation évoque l'image plaisante d'une science objective et honnête. Mais cette image est fausse. Et d'abord parce que « toute théorie naît réfutée » et, si ce n'est pas le cas, il est du moins très courant qu'une théorie soit proposée même si l'on sait qu'elle ne cadre pas avec les faits connus. C'est l'argument de Kuhn à propos de la science normale qui résout des énigmes. Par ailleurs, il n'y a pas (selon Lakatos) de frontière bien précise entre l'observation et la théorie. Et enfin, on peut faire remarquer, avec Pierre Duhem, le grand historien des sciences français, que les théories sont vérifiées par l'intermédiaire d'hypothèses auxiliaires. Pour reprendre son exemple, un astronome ayant prédit qu'un corps céleste devait se trouver à un certain endroit ne doit pas obligatoirement replonger dans ses livres s'il s'avère qu'il s'était trompé. Il peut revoir la théorie du télescope ou produire un compte rendu approprié de la façon dont le phénomène diffère de la réalité (Kepler), ou inventer une théorie des aberrations astronomiques (G.G. Stokes), ou encore suggérer que l'effet Doppler s'exerce différemment dans l'espace intersidéral. Ainsi une observation récalcitrante ne doit pas être considérée comme une réfutation automatique de la théorie. Duhem considère probablement que le fait qu'une théorie, ou l'une de ses hypothèses auxiliaires, soit revue n'est qu'une question de choix ou de convention. Duhem étant connu pour son anti-réalisme, il n'est pas étonnant qu'il en vienne à cette conclusion. Mais elle répugne au réalisme scientifique instinctif de Popper ou de Lakatos. (Hacking, 1989, p. 193-194).

C'est pourquoi le falsificationniste a besoin d'ajouter deux propositions supplémentaires dont la première stipule qu'aucune théorie ne peut être rejetée ou abandonnée si l'on ne dispose d'une meilleure théorie pour la remplacer; et, la seconde nous dit qu'une théorie est meilleure qu'une autre si elle effectue plus de prévisions nouvelles. D'autre part, alors que traditionnellement les théories devaient être en accord avec les données expérimentales, le falsificationniste, quant à lui, n'exige pas de la théorie qu'elle soit en accord avec l'expérience, mais plutôt qu'elle la précède. En conséquence, le falsificationnisme sophistiqué de Lakatos (et celui de Popper) ne saurait être une philosophie de l'intervention, ce qui signifie qu'il ne peut pas être non plus une philosophie des nanotechnosciences. On comprend donc pourquoi ce dernier point soulevé par le théoricien des programmes de recherche fit l'objet de nombreuses controverses dont les moindres ne sont ni celle suscitée

par bon nombre d'inductivistes qui pensent que si les données sont en accord avec l'expérience, alors elles la supportent, et ce, que la théorie soit antérieure aux données ou que les données lui soient antérieures ; ni celle provoquée par ceux qui se sentent plus proches du rationalisme et du déductivisme [qui] insisteront sur ce que Lakatos appelle : « La recommandation de Leibniz-Whewell-Popper selon laquelle *l'édification, consciencieuse, de la ruche doit aller beaucoup plus vite que l'enregistrement des faits qui sont censés y trouver un abri (...).* » (Hacking, 1989, p. 193-194).

Revenant sur la théorie des programmes de recherche de Lakatos, Hacking la distingue des programmes de recherche états-uniens habituels dont l'orthographe ne prend qu'un seul « m » en s'écrivant « *program* » plutôt que « *programme* », tel qu'a choisi de l'orthographier le Magyar. En effet, le *program* de recherche se rapporte à l'idée d'un problème précis fait d'une combinaison clairement définie d'idées théoriques expérimentales, comme l'explique Hacking. Ce *program* de recherche est le mode privilégié d'expression des chercheurs en quête de fonds ou d'appuis. Le *programme* lakatosien, en revanche est bien différent du précédent puisque le sien est plus abstrait et plus historique. Il désigne, en effet, « la façon dont les théories peuvent se succéder et se développer sur des périodes couvrant parfois plusieurs siècles, pour ensuite sombrer dans l'oubli pendant quatre-vingts ans et être finalement réanimées par un apport de faits et d'idées totalement nouveau. » (Hacking, 1983, p. 196).

Mais encore, comme nous l'avons vu au quatrième chapitre, le programme de recherche lakatosien est structuré de manière à privilégier sa stabilité et sa rationalité en partie en réponse à la conception kuhnienne de la science normale auquel Lakatos reproche la nature hasardeuse en matière de découverte d'anomalies, puisque le contexte de résolution d'énigmes ne favoriserait pas le repérage des anomalies dont quelques-unes seulement font l'objet de recherches systématiques. La méthodologie défendue par Lakatos, par contre, prétend hiérarchiser les problèmes dont quelques-uns seulement sont soumis à une recherche systématique.

Ce choix justifie la création d'une « ceinture protectrice » autour du « noyau dur », permettant ainsi de n'aborder que les questions les plus urgentes et déterminées à l'avance. Dans ce modèle mis en place par Lakatos, certaines réfutations qui peuvent être sans intérêt sont ignorées, ce qui lui permet de soutenir contre Popper l'importance de la vérification en science. D'autre part, puisqu'on décide de ne travailler que sur certains problèmes, le choix d'ignorer certaines réfutations et de procéder à des vérifications pourrait être justifié, surtout s'il permet à terme de trouver des solutions (Hacking, 1983, p. 196-197). En outre, un programme de recherche comporte une succession de théories dont chacune se doit d'être au moins autant en accord avec les faits précédemment expliqués par l'ancienne théorie. Si les nouvelles théories en plus de comprendre celles qui les ont précédées prévoient d'autres faits nouveaux non élucidés par celles-ci, leur progressivité est assurée. En effet, si les prévisions des nouvelles théories se vérifient, elles sont considérées comme empiriquement progressives, un programme donné étant dit progressif si c'est effectivement le cas théoriquement et empiriquement parlant. Dans le cas contraire, il est en dégénérescence (Hacking, 1989, p. 197).

À la suite de ces rappels qui nous ont fait revenir sur l'essentiel de ce que nous avons dit de la philosophie de Lakatos, Hacking se demande où le Magyar veut en venir. En réponse à sa question, il formule l'hypothèse selon laquelle Lakatos voudrait trouver un substitut à l'idée de vérité. À cet égard, il est comparé à Putnam laissant planer l'idée que « la théorie de la vérité comme correspondance est erronée et que la vérité est tout ce qu'il est rationnel de croire. » Mais, pour Hacking, Lakatos qui n'est pas un pragmatiste de la dernière heure va plus loin que Putnam. Il n'affronte pas une théorie de la vérité, mais bien la vérité elle-même qu'il chercherait à remplacer plutôt que la théorie par correspondance considérée comme faite d'erreur. (Hacking, p. 200). Hacking renchérit en soutenant que :

Lakatos, formé dans la tradition hégélienne, ne se préoccupe guère de la théorie de la correspondance. Cependant, comme Peirce, il donne à l'objectivité une place dans la science que Hegel est loin de lui accorder. Putnam honore cette valeur, en espérant, comme Peirce, qu'il existe une méthode scientifique sur laquelle nous pourrions nous accorder et qui nous mènera ainsi à une croyance rationnelle et sûre. Putnam est



simplement peircien même si, contrairement à Peirce, il doute que nous soyons vraiment sur la dernière ligne droite. La rationalité regarde de l'avant. Lakatos franchit une étape supplémentaire. La rationalité ne regarde pas de l'avant, mais nous pouvons appréhender l'objectivité de nos présentes croyances en retraçant les pas qui nous y ont menés. Où commence-t-on ? Avec la croissance du savoir lui-même. (Hacking, p. 200).

Poursuivant son analyse, Hacking estime que le seul point stable dans la tentative de Lakatos est le fait que la croissance du savoir est bien réelle, ce qui lui permet de tenter de construire sa philosophie sans représentation, en se servant du fait que l'on peut constater que le savoir croît quelle que soit, par ailleurs, notre opinion sur la vérité ou la réalité. Une telle conception peut entraîner trois façons de voir les choses. La première est que le fait que l'on en sache plus aujourd'hui que les génies des temps passés est indubitable. Ce qui est à la fois profond et élémentaire puisque, même si l'important n'est pas le fait qu'il y ait du savoir, mais plutôt de la croissance. Il est clair, en effet, que nous en savons plus sur les masses atomiques aujourd'hui qu'avant, même si de nouvelles et plus larges reconceptualisations sont à prévoir pour l'avenir. La seconde est qu'il y a peut-être des marginaux qui pensent que la découverte des isotopes ne contribue pas à la croissance du savoir réel et Lakatos ne cherche pas à les contredire. Mais il présume qu'ils n'ont probablement jamais lu les textes et ne se sont jamais intéressés aux résultats expérimentaux marquant cette croissance. En conséquence, il est inutile de débattre avec de tels ignorants qui changeront d'avis dès qu'ils auront appris à utiliser les isotopes ou à lire les textes. (Hacking, 1989, p. 202). La troisième, enfin, consiste à penser que la croissance du savoir scientifique aurait le pouvoir de fournir les critères de distinction entre activités rationnelles et irrationnelles pour autant qu'elle soit intelligemment analysée. (Hacking, 1989, p. 202).

Cependant, sur cette dernière façon d'envisager les choses, Hacking reproche à Lakatos de mélanger un peu tout puisque la persistance des commentaires sur le Talmud, bien qu'ils soient plus raisonnés que la littérature scientifique, ne suffit pas à en faire une activité rationnelle. Cette dernière n'est pas à la hauteur quand il s'agit de produire une évaluation positive. De son avis :

Les philosophes posent souvent la fastidieuse question de savoir pourquoi l'astrologie occidentale du XX<sup>e</sup> siècle n'est pas considérée comme une science. Mais ce n'est pas à ce niveau que se pose le vrai problème de la distinction. Popper voit plus juste lorsqu'il conteste le droit de la psychanalyse ou de l'historiographie marxiste à se prétendre « science ». La lourde machine des programmes de recherche, des noyaux et des ceintures de protection, du progrès et de la dégénérescence doit, si elle a quelque valeur, effectuer une distinction non pas entre le rationnel et le raisonnement d'une part et l'irrationnel et le non-raisonnement d'autre part, mais plutôt entre ces raisonnements qui mènent à ce que Popper et Lakatos appellent le savoir objectif et ceux qui poursuivent d'autres objectifs et suivent d'autres démarches intellectuelles. (Hacking, 1989, p. 202-203).

Pour Hacking, ceci montre que l'évaluation des théories scientifiques n'est pas le fort de Lakatos qui n'a aucune perspective à offrir aux théories scientifiques qui se font maintenant concurrence. Avec les critères qui sont les siens, on peut tout au plus regarder rétrospectivement les programmes de recherche et dire pourquoi certains ont progressé et d'autres non. Le philosophe de l'intervention estime aussi que la méthodologie du Magyar non seulement ne nous donne pas assez de repères, mais de plus elle ne nous incite pas à accorder une foi exagérée dans nos propres projets puisque les rivaux pourraient bien prendre le dessus. Par contre, nous dit Hacking, pour Lakatos lorsque le programme que l'on défend est dans une mauvaise passe, on pourrait comprendre l'entêtement de ses partisans.

Cependant, à la place d'une vraie méthodologie, il semble préconiser une sorte de liste des valeurs supposées de la science prétendument libre de toute idéologie avec pour devises, la prolifération des théories, la prudence dans l'évaluation ainsi que le suivi honnête des résultats pour savoir quel programme est fécond et se montre à la hauteur des nouveaux défis. Mais, pour Hacking, le véritable but de Lakatos n'est pas l'évaluation de la théorie, puisque selon lui, de toute façon, le fait que sa méthodologie soit seulement rétroactive n'est pas un défaut, la possibilité de prédire si un domaine de recherche actuel est un bon présage pour l'avenir relevant plus du truisme qu'autre chose. La question majeure est plutôt d'ordre pratique puisqu'il s'agit au fond de dire comment faire pour cesser de supporter un programme que l'on soutient financièrement depuis plusieurs années et qui a fini par s'avérer peu

productif, alors que de nombreux jeunes chercheurs lui ont dédié leur carrière. (Hacking, 1989, p. 204).

D'autre part, Hacking note que pour comprendre l'objectivité, Lakatos a recours à l'histoire qu'il subdivise en parties interne et externe. Cependant, il pense que celui-ci s'est livré à une instrumentalisation abusive de l'histoire au point de la travestir. À ce sujet, il cite le livre de Gerald Holton, *Scientific Imagination* (1978), qui traite l'histoire des programmes de recherche de « parodie de l'histoire dont la lecture fait se dresser les cheveux sur la tête ». Selon lui, la subdivision de Lakatos non seulement n'est pas orthodoxe, mais de plus ignore les véritables enjeux de cette opération. L'histoire dite « externe » traite des facteurs économiques, sociaux et technologiques considérés comme indirectement liés au contenu même de la science, tout en influençant certains événements et en expliquant d'autres. L'histoire « interne » quant à elle est habituellement associée à celle des idées se rapportant à la science et concerne les motivations des chercheurs, leurs modes de communication et leur filiation intellectuelle. Cette histoire est ainsi une sorte d'abstraction que Hacking qualifie de savoir aliéné, hégélien, d'histoire de programmes de recherche anonymes et autonomes. (Hacking, 1989, p. 205). Sur cette subdivision lakatosienne de l'histoire, le philosophe canadien termine son analyse affirmant que :

Cette conception de la croissance du savoir comme quelque chose de non humain, d'objectif, était déjà en germe dans le premier ouvrage important de Imre Lakatos, *Preuves et réfutations*\*, A la page 187 de ce merveilleux dialogue sur la nature des mathématiques, on trouve ceci : « L'activité mathématique est une activité humaine. Certains de ses aspects, comme de toute activité humaine, peuvent être étudiés par la psychologie, d'autres par l'histoire. L'heuristique initialement ne s'intéresse pas à ces aspects, mais l'activité mathématique produit des mathématiques et les mathématiques, ce produit de l'activité humaine, "s'aliène" l'activité humaine qui les a produites ; elles développent leurs propres lois de croissance, leur propre dialectique. »

Tels sont les ferments de la redéfinition de l'« histoire interne » proposée par Lakatos, la doctrine qui sous-tend ses « reconstructions rationnelles ». Une des leçons de *Preuves et réfutations* est que les mathématiques peuvent être à la fois dépendantes de l'activité humaine et autonomes, avec leurs propres critères internes d'objectivité. Objectivité qui peut être analysée en fonction de la croissance même du savoir mathématique. Popper avait suggéré qu'un tel savoir objectif pourrait être un



« troisième monde » de réalité et Lakatos a joué avec cette idée. (Hacking, 1989, p. 205-206).

Sur la question de l'observation, Hacking reproche à Lakatos d'avancer des arguments superficiels et totalement inefficaces pour réfuter l'idée popperienne de distinction entre théorie et observation. Pour le théoricien des programmes de recherche, en effet, en ce qui concerne la théorie, la règle qui veut que l'homme propose et la nature dispose n'est pas acceptable, car elle repose, selon lui, sur deux hypothèses erronées. La première veut qu'il y ait une frontière psychologique entre propositions spéculatives et observationnelles, alors que la seconde soutient que ces mêmes propositions observationnelles peuvent être prouvées par les faits, juste en les regardant. Hacking, surpris par l'argument de Lakatos selon lequel aucune proposition concernant les faits ne peut être prouvée par l'expérience, déclare « qu'un penseur comme Lakatos, qui m'a appris ce que « prouver » veut dire, en dispose ici avec une telle légèreté est particulièrement décourageant. » (Hacking, 1989, 281). Pour lui, après avoir fait remarquer que « prouver » signifie au sens propre « vérifier » et que les vérifications permettent bien souvent d'établir des faits, Lakatos ne devrait pas pouvoir écarter la seconde hypothèse aussi facilement. En tout cas, pas si « c'est à l'œuvre que l'on juge l'artisan », et que « la preuve d'un texte est dans ses « épreuves » », et encore moins si « l'œuvre est médiocre, les épreuves pleines de fautes d'impression ». (Hacking, 1989, p. 281).

À la suite de cette critique, Hacking semble partiellement se satisfaire de la solution apportée par les travaux de Paul Feyerabend qui contrairement à Hanson, par exemple, n'accorde pas beaucoup d'importance à la distinction entre théorie et observation. Le philosophe canadien estime que l'anarchiste méthodologique s'est débarrassé de l'obsession philosophique pour le langage et le sens en dénonçant la notion même de charge théorique puisque dire d'un énoncé qu'il porte une charge théorique, c'est laisser croire que l'observation serait un véhicule que l'on charge d'éléments théoriques alors qu'il n'existe rien de tel à cause du fait que la théorie est absolument partout (Hacking, 1989, p. 281-282). Mais malheureusement, l'affirmation de Feyerabend qui consiste à dire que les rapports d'observations et



autres contiennent ou impliquent toujours des hypothèses théoriques est fermement rejetée par Hacking à moins, reconnaît-il, d'atténuer fortement le sens des mots, ce qui conforterait le propos de l'anarchiste méthodologique en lui ôtant tout intérêt. Ce dernier utiliserait le mot « théorie » pour évoquer toute sorte de croyances incomplètes, implicites ou encore de seconde main (Hacking, 1989, p. 288-289).

Pour en finir avec Lakatos, Hacking déclare qu'une philosophie dominée par la théorie rend toujours aveugle à la réalité. Or, dès l'introduction de *Concevoir et expérimenter*, il déplore le fait que les philosophes se soucient essentiellement de justification, de logique, de raison, de justesse et de méthodologie. Popper et Carnap, par exemple, nous dit-il, ne se soucient ni des circonstances de la découverte, ni des détours psychologiques, ni des interactions sociales, encore moins du milieu économique. S'ils ont recours à l'histoire, ce n'est que pour la chronologie ou l'illustration anecdotique. En raison de cela, Popper, bien qu'ayant certaines affinités avec Kuhn, et Carnap ont développé des philosophies que Ian Hacking n'hésite pas à qualifier d'« intemporelles », c'est-à-dire « hors du temps, hors de l'histoire » (Hacking, 1989, p. 29).

Or, soutient-il, certains types de découvertes expérimentales peuvent servir de repère en « énonçant des faits constants concernant les phénomènes que toute future théorie doit prendre en compte et qui, avec d'autres repères théoriques comparables, nous oriente presque constamment dans une direction. » (Hacking, p. 407). En atteste l'expérience controversée de Michelson et Morley ainsi analysée :

On a considéré que cette expérience était un élément décisif dans le rejet de l'idée newtonienne d'un éther omniprésent. La relativité remplacera cette conception. Mais en fait, Einstein connaissait à peine l'expérience de Michelson et Morley et il n'a certainement jamais été question de « comparer Newton et Einstein ». Lakatos se sert de ce fait comme d'un élément central dans sa charge contre les expériences cruciales. Il s'en sert également pour affirmer que toute expérience est soumise à la théorie.

En fait, l'expérience est un bon exemple de l'exploration baconienne de la nature. Elle a été et sera toujours l'objet de controverses, mais elle permet d'opposer à Lakatos une thèse expérimentaliste. (Hacking, 1989, p. 407-408).

En effet, alors que Lakatos conçoit l'expérience de Michelson comme une opération ayant eu pour but premier de vérifier les théories contradictoires de Fresnel et Stokes sur l'influence probable du mouvement de la Terre sur l'éther, Hacking soutient que ce ne fut pas le cas. Selon lui, l'intention de Michelson était plutôt de mesurer le mouvement de la Terre par rapport à l'éther sans tenir compte de la moindre théorie en réalisant ainsi ce que Maxwell avait jugé impossible. À l'issue de cette expérience concernant le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, Michelson révélera que le résultat fut négatif. S'il avait été positif, il aurait permis de déterminer le mouvement absolu de la terre dans l'espace. Bien que Lakatos fit dire à Michelson que son expérience de 1881 était une expérience cruciale qui départageait les explications de l'aberration de Fresnel et Stokes en prouvant la théorie de ce dernier, Hacking conteste cette interprétation, lui préférant celle prêtée à Michelson lui-même selon laquelle il n'y aurait pas de déplacement des franges d'interférence. En conséquence, le résultat de l'hypothèse d'un éther immobile n'ayant pas été confirmée, celle-ci était donc erronée. Ainsi, Michelson n'aurait pas prouvé que Stokes avait raison, mais tout au plus il aura démontré que Fresnel avait tort. En outre, il estime que ses résultats contredisaient directement l'explication du phénomène d'aberration de Fresnel généralement accepté. Ainsi, contrairement à ce que dit Lakatos là-dessus, Michelson ne considère pas avoir fait la preuve des hypothèses de Stokes et il ne dit pas non plus que son expérience est décisive. Il se contente plutôt de faire valoir implicitement « le triomphe de l'expérimentateur sur le théoricien », comme pour dire « maintenant je peux déterminer ce qui, jusqu'à présent, vous était inaccessible » (Hacking, 1989, p. 413).

Dans la suite de son analyse, le philosophe de l'intervention s'inspire de Bacon qui adopte une division imagée des activités expérimentale, théorique et scientifique qu'il fait correspondre respectivement à la fourmi, l'araignée et l'abeille. La figure de l'expérimentateur, telle une fourmi, est une bête d'ouvrage, le théoricien, telle l'araignée qui tisse sa toile dans l'espoir d'y emprisonner ses proies, conçoit sa théorie afin d'y capturer les faits ; et le scientifique baconien, tel l'abeille, est capable de faire la synthèse du spéculatif et du concret puis de les digérer en vue d'en faire

du miel, disons, « technoscientifique ». Selon Hacking, Michelson était un peu comme la « fourmi » de Bacon, très doué pour monter des expériences, mais un peu faible sur la théorie ; Lorentz, quant à lui, était un peu comme « l'araignée » de Bacon qui encourageait les travaux de Michelson tout en essayant de développer une mathématique qui permettrait d'expliquer l'éther de manière satisfaisante. Ainsi, nous dit-il :

Si l'on doit parler de programme en dégénérescence, c'est plutôt du côté de Lorentz qu'il faut alors se tourner. Mais il est plus intéressant d'étudier les interactions qui existaient entre ces deux sortes de talent. L'intérêt stupéfiant des théories de la relativité d'Einstein fait bien sûr, dans ce domaine, pencher la balance du côté du travail théorique. Mais, dans le domaine de la technique expérimentale, Michelson découvrit lui aussi de nouveaux mondes. (Hacking, 1989, p. 417).

Autrement dit, dans cette perspective baconienne, les facultés expérimentales et rationnelles sont nécessaires à la science pour s'accomplir en tant que telle. La critique de Hacking à Lakatos, comme nous venons de le voir, se fait dans le prolongement de celui qu'il a fait à Kuhn et s'étend à l'ensemble des philosophes des sciences, même si c'est à des degrés divers. Elle peut se résumer en critique du représentationnalisme qui constitue en quelque sorte leur dénominateur commun.

En définitive, c'est bien cela que confirme Gilbert Hottois quand il dit qu'au fond, même s'il n'est pas aisé de dénouer l'écheveau des rapports entre philosophie, science et langage chez Hacking, ce dernier reproche aux philosophes des sciences en général, leur focalisation sur les théories et leur négligence de l'expérimentation (Hottois, 2004a, p. 77). À cet égard, Hottois rappelle les propos de Hacking selon lesquels les philosophes des sciences discutent constamment des représentations de la réalité, mais ils ne disent presque rien de l'expérimentation, de la technologie, ou de l'usage de la connaissance pour modifier le monde. Ceci est étrange, car la « méthode expérimentale » n'est ordinairement qu'un autre nom pour dire « méthode scientifique » (Hottois, 2004a, p. 77). C'est pourquoi Hacking comprend d'autant moins l'obsession des philosophes des sciences à voir dans la science une activité et un produit essentiellement langagier, et ce, malgré le fait que, pour Hottois, ce

soit cette identité linguistique qui permet d'expliquer que la philosophie des sciences puisse être si généralement philosophie du langage (Hottois, 2004a, p. 78). Pour lui, le problème de l'enchevêtrement du langage et de la vision est infiniment plus étendu à la fois en philosophie des sciences et en philosophie en général. Ce constat amène le philosophe belge à soutenir que Hacking a insuffisamment clarifié la question du langage puisqu'il faudrait interroger le rapport entre philosophie et langage, science et langage, ainsi que « l'évolution de ces rapports dans notre forme de vie de plus en plus technicienne ainsi que l'importance extrême du langage pour la philosophie contemporaine (y compris pour la philosophie des sciences). » Or, nous dit Hottois, la critique par Hacking de la philosophie du langage est principalement motivée par le fait que les philosophes du langage approchent la science comme représentation, et non comme discours. » (Hottois 2004a, p. 79-80). Si Hottois s'interdit d'entrer dans ce qu'il appelle les « riches développements et illustrations historiques et actuelles grâce auxquels Hacking entreprend de nous faire voir la science sous l'angle de l'intervention, du faire, de l'expérimentation avec ou sans théorie, afin de rompre l'obsession de la science comme représentation théorique vraie du réel. » (Hottois, 2004a, p. 80), c'est précisément cela même que nous envisageons d'examiner à présent, d'une certaine façon, par-delà la représentation.

## 5.2. ... à la science qui intervient

Selon Hottois, les riches développements et illustrations historiques actuels ont permis à Hacking de nous faire voir la science sous l'angle de l'intervention, du faire, de l'expérimentation avec ou sans théorie « afin de rompre l'obsession de la science comme représentation théorique vraie du réel. » (Hottois, 2004a, p. 29). Pour nous, c'est cette orientation que donne Hacking à sa philosophie qui revêt un intérêt particulier pour la question des nanotechnosciences qui importe ici. Car, comme nous l'avons vu, dans ce domaine, l'intervention occupe une place



prépondérante, tant pour voir que pour faire. En outre, dès qu'il s'agit de nanos, le pouvoir traditionnel de la représentation est soumis à rude épreuve par les propriétés auxquelles sont confrontés les chercheurs à l'échelle nanométrique. Même si le but ultime de Hacking est de s'éloigner du réalisme à propos des théories pour aller vers le réalisme des entités dans un mouvement qui l'éloigne ainsi de la représentation pour le mener vers l'intervention (Hacking, 1989, p. 29), il n'en sert pas moins notre objectif qui est de trouver rétrospectivement une philosophie des sciences assez prospectiviste pour donner aux nanotechnosciences la philosophie qu'elles méritent. De toutes les philosophies à l'étude desquelles nous nous sommes engagés, celle qui semble se prêter le mieux aux défis des nanos est celle que nous examinons présentement. Selon Hacking, en effet :

Les philosophes des sciences débattent constamment des théories et représentations de la réalité, mais ne disent presque rien de l'expérimentation, de la technologie ou du savoir comme outil de transformation du monde. C'est d'autant plus étrange que « méthode expérimentale » a pendant longtemps été synonyme de « méthode scientifique ». Le scientifique se devait alors, selon l'image populaire, de porter la blouse blanche et de travailler dans un laboratoire. Bien sûr, la science a précédé les laboratoires. À l'expérimentation, les aristotéliens préféraient la déduction à partir des premiers principes. Mais la révolution scientifique du XVII<sup>e</sup> siècle changea tout cela à jamais. On déclara officiellement que l'expérimentation était la voie royale vers le savoir et l'on se moqua des étudiants qui argumentaient à partir des seules connaissances livresques plutôt qu'en observant le monde autour d'eux. Francis Bacon (1561-1626) fut le philosophe de cette époque révolutionnaire. Il enseignait qu'il faut observer la nature dans son état brut, mais aussi qu'il faut « tordre la queue du lion », intervenir dans le monde pour apprendre ses secrets. (Hacking, 1989, p. 245).

Selon Hottois, Hacking montre que l'information de la vision par la théorie tantôt aide tantôt empêche l'observation de ce qui est intéressant et significatif. Mais ce qui l'interpelle le plus dans ce contexte d'une science devenue davantage intervention que représentation, c'est le développement des instruments d'observation. L'approche du réel comme « chargée de technique » (*technology loaded*) et pas simplement « chargée de théorie » (*theory loaded*). Par exemple, les neutrinos émis par le soleil permettent d'en observer l'intérieur alors que des longueurs d'onde invisibles à l'œil nu permettent de voir à travers des microscopes dont les images observées sont reconstruites à partir d'interactions mesurées comme une cartographie. Ainsi, la réalité de ce qui est observé augmente lorsque des

technologies différentes permettent de confirmer des observations convergentes réduisant ainsi le risque d'erreurs lié à la production involontaire d'artefacts relatifs à l'appareillage utilisé ou d'autres interférences inattendues. En conséquence, pour servir la cause de Hacking, on pourrait dire avec Hottois que d'une certaine façon, plus un phénomène observé résiste aux interactions ou actions observationnelles des expérimentateurs, plus il acquiert de réalité et d'identité, un peu comme si son être en tant que tel se renforçait.

Parallèlement, dans le contexte nanotechnoscientifique qui nous intéresse ici, l'on peut dire que la différence entre science et technologie est très ténue. Autant dire que l'essentiel est dans l'orientation ou à l'issue réservée à la pratique scientifique ou technologique. Toutes les deux sont technologiquement chargées et leur différence est plus une question d'orientation que de nature. En effet, alors que la science est théoriquement orientée (explication, prédiction, loi/régularité scientifique, théorie), la technologie est pratiquement orientée (manipulation, ustensilisation, commodités matérielles, sociales, militaires, dispositifs simples ou complexes destinés à un usage pratique). Même les sciences théoriques ont recours à la technologie afin de mesurer, calculer, stimuler et simuler leurs hypothèses. En vérité, nous sommes devenus une société presque totalement « technologisée » et tout dans nos maisons, nos villes, nos mers et nos espaces crédite cette thèse. Il ne serait pas faux de dire que nous avons atteint l'ère du tout technologique, à peu de choses près. Chaque parcelle de nos vies, depuis la maison et ses composants, l'eau courante, l'électricité, les rues et les trottoirs, les transports en commun, nos vêtements, nos outils de travail, notre alimentation, nos meubles et même nos papiers d'identification... Cette omniprésence actuelle des réalisations technologiques peut laisser perplexe quant à l'idée d'une science supposée exclusivement en amont de la technologie, voire matrice de toute technologie.

Dans cette toute dernière partie de notre analyse, nous allons examiner, avec Hacking, la question de l'expérience scientifique dans ses méandres théorico-technologiques dans un premier temps, avant d'aborder celle de l'observation en

général, mais en nous appesantissant sur l'intervention du microscope en particulier, puisque chez Hacking il n'est pas encore question de nanoscope.

### 5.2.1. Théorie et expérience

Nous pouvons dire que c'est l'émergence d'une technologie appropriée qui a converti Hacking au réalisme. En fait, la question des rapports entre théorie et expérience revient chez Hacking à se demander si l'expérience n'aurait de sens que dans la mesure où elle contribue à vérifier une hypothèse. Nous allons voir que même si l'on ne peut pas nier que la théorie précède souvent l'expérimentation, il n'en est pas toujours ainsi, bien loin de là. Afin de répondre convenablement à cette question, Hacking suggère de commencer par se demander : qu'est-ce que la réalité ? De la réponse à cette question dépend, d'une certaine façon notre posture représentationnaliste ou interventionniste. Selon le philosophe canadien, la réalité a quelque chose à voir avec la cause et les notions que nous avons de la réalité nous viennent de notre capacité à changer le monde. Il se pourrait qu'il y ait deux origines mythiques de la réalité, l'une justifiant la représentation, tandis que l'autre serait lié à l'idée que ce qui nous affecte et que nous pouvons affecter est réel (Hacking, 1989, p. 242). Constatant que le réalisme scientifique a souvent été abordé au nom de la représentation, Hacking se propose d'en parler au nom de l'intervention.

Ainsi sa position sans ambages est que nous devrions considérer comme réel tout ce dont nous pouvons nous servir pour intervenir dans le monde de manière à affecter quelque chose d'autre ou qui peut être utilisé pour nous affecter. Selon lui, avant la science moderne, la réalité en tant qu'intervention se distinguait nettement de la réalité comme représentation, malgré le fait que l'aventure des sciences expérimentales depuis le XVII<sup>e</sup> siècle réside dans le dialogue entre représentation et intervention. Ceci fait dire à Hacking qu'alors que « méthode expérimentale » était pendant longtemps synonyme de « méthode scientifique », la philosophie a trois siècles de retard qu'il serait temps qu'elle rattrape (Hacking, 1989, p. 242). Les efforts de Hacking s'inscrivent dans cette optique de rattrapage qui devrait lui



permettre de sortir les philosophes des sciences des débats incessants autour des théories et représentations de la réalité pour les mener vers une plus grande considération de l'expérimentation, de la technologie ou du savoir comme outil de transformation du monde. Cependant, ainsi que nous l'avons annoncé en introduisant ce sous-chapitre, il convient que la science a précédé les laboratoires et que les aristotéliens préféraient la déduction à partir des premiers principes. Mais, la révolution scientifique du XVII<sup>e</sup> siècle vint chambouler tout cela et l'expérimentation devint la voie privilégiée vers le savoir par opposition aux enseignements plusieurs fois séculaires de la scolastique dont les étudiants, argumentant uniquement à partir de leurs connaissances livresques plutôt qu'en confrontant le monde qui les entoure, faisaient l'objet de plus en plus de railleries. En tant que philosophe de cette époque révolutionnaire, Bacon (1561-1626) enseignait aussi bien l'observation de la nature que l'intervention dans la nature afin disait-il de « tordre la queue du lion » pour lui soutirer ses secrets. De l'avis de Hacking, en effet, les lois ne sont pas à l'origine des phénomènes puisqu'aucune loi ne peut provoquer l'apparition de quelque chose. Afin d'appuyer sa thèse, il fait appel à *How the laws of physics lie* (1983) en prêtant les propos suivants à l'auteure :

Cartwright souligne que, dans plusieurs branches de la mécanique quantique, il est normal pour le chercheur d'utiliser toute une batterie de modèles du même phénomène. Personne ne pense que l'un de ces modèles représente la vérité dans sa totalité, ils peuvent même être totalement incompatibles. Il s'agit d'outils intellectuels qui nous aident à comprendre le phénomène et à édifier morceau par morceau la technologie expérimentale. Ils nous permettent d'intervenir dans des processus et de créer des phénomènes nouveaux, jusqu'alors inconnus. Mais les choses ne se produisent pas en vertu de l'ensemble des lois ou même des vraies lois. Aucune loi ne peut prétendre provoquer l'apparition de quelque chose. Ce sont les électrons et les diverses particules qui sont responsables des effets. Les électrons sont réels : ils produisent des effets. (Hacking, 1989, p. 76).

Commentant cette thèse de Cartwright, Hacking estime qu'un étonnant changement de direction est opéré par cette dernière relativement à la tradition empiriste remontant à Hume pour qui seules les régularités sont réelles. Or, Cartwright avance que dans la nature, point de régularités vraiment profondes et uniformes. Ces dernières sont plutôt des traits caractérisant la façon dont nous construisons les théories afin de pouvoir penser les choses (Hacking, 1989, p. 76). Puis, revenant



sur les relations entre théorie et expérience, que nous avons essayé de décrypter tant au chapitre III, que nous avons consacré à Kuhn, qu'aux suivants qui ont porté sur les philosophies de Lakatos et Robert, puis Hacking, dans une optique similaire, se pose la question : laquelle de l'expérience ou de la théorie vient en premier ? Selon lui, l'expérimentation ne vise pas à confirmer la tâche du théoricien et les rapports entre théorie et expérience varient selon le niveau de développement de l'activité scientifique concerné, étant entendu que les sciences de la nature n'ont pas les mêmes cycles (Hacking, p. 254). Ainsi, alors que Popper concevait l'expérience comme un travail d'espèce théorique, Hacking lui oppose, entre autres exemples, le suivant :

Davy remarquant la présence de bulles d'air sur les algues nous en fournit un. Dans son cas, il ne s'agit pas d'une « interprétation faite à la lumière de théories », car Davy n'avait à l'origine aucune théorie. Et constater que la mèche brûle n'est pas non plus une interprétation. Peut-être, s'il avait ajouté : « Ah ! alors c'est de l'oxygène », aurait-il fait une interprétation, mais ce ne fut pas le cas. (Hacking, 1989, p. 254-255).

Toutefois, les observations peuvent être stimulantes pour la théorie comme en atteste d'une part l'exemple de la polarisation par la réflexion découverte en 1808 par un colonel du corps des ingénieurs de Napoléon, E.L. Malus qui faisait des expériences sur le spath d'Islande lorsqu'il remarqua les effets du soleil couchant sur les fenêtres du palais du Luxembourg ; d'autre part celui de la fluorescence observée pour la première fois en 1845 par John Herschel alors qu'il s'intéressait à la lumière bleue émise par une solution de sulfate de quinine éclairée d'une certaine manière. Pour Hacking, des observations de valeur de ce type ne peuvent être que le début d'un processus. Cependant, contrairement à l'avis de représentationnalistes comme Popper, Hacking estime que l'on ne pourrait pas affirmer que certaines observations précéderaient la théorie tout en accordant que toute expérience délibérée serait dominée par la théorie. Le cas de David Brewster, qu'il qualifie d'expérimentateur le plus important dans le domaine de l'optique expérimentale, en est une bonne illustration. Celui-ci détermina les lois de la réfraction et de la réflexion pour la lumière polarisée et savait comment provoquer la biréfringence dans des corps sous-tension en plus d'avoir découvert la double réfraction pour les

cristaux biaxes et initia des travaux vers les lois de la réflexion des métaux. Bien que l'on parle maintenant des lois de Fresnel qu'il a traitées dans le cadre de la théorie ondulatoire et des lois du sinus permettant de déterminer l'intensité de la lumière polarisée réfléchie, ce fut Brewster qui, dès 1818, les avait publiées. Ce dernier fut sans conteste un brillant expérimentateur, mais ses conceptions théoriques le desservir puisqu'il vouait un attachement aveugle à la théorie de Newton et croyait que les rayons lumineux étaient corpusculaires. Il se contentait de vouloir découvrir le comportement de la lumière, sans chercher à vérifier ou à comparer une quelconque théorie. Hacking dit de lui qu'il fut un fervent partisan de la « mauvaise » théorie bien qu'il ait créé des phénomènes expérimentaux que seule la « bonne » théorie qu'il rejeta fermement nous permet de comprendre. Ainsi, même s'il n'« interpréta » pas ses découvertes expérimentales à la lumière de sa mauvaise théorie, il produisit des phénomènes dont toute théorie doit nécessairement tenir compte (Hacking, 1989, p. 257-258).

Ceci dit, le cas de Brewster n'est pas unique puisque Hacking nous parle aussi de R.W. Wood, expérimentateur de renom, qui apporta lui aussi une contribution fondamentale à l'optique quantique. Paradoxalement, Wood était très sceptique sur la mécanique quantique elle-même. Sa contribution, à l'instar de celle de Brewster, ne provint pas de la théorie, mais d'une grande habileté à induire de nouveaux comportements dans la nature (Hacking, 1989, p. 288). Si nous mettons les choses dans le contexte actuel des nanotechnosciences, l'avènement des nanoscopes a très largement favorisé des développements similaires de type *bottom-up* dont, pour certains, les chercheurs tentent encore des solutions et des explications comme nous l'avons vu au chapitre II, notamment avec les thèses de Joachim et Plévert (2009) que nous y avons largement exposées. D'un autre côté, Hacking remarque que certains phénomènes sont sans signification. Ce qui ne veut pas dire pour lui qu'une observation valable se suffit à elle-même, mais il existe beaucoup de phénomènes laissés en friche, car personne ne comprend encore leur signification, ni comment ils se relient aux autres, encore moins à quelles fins ils pourraient être utilisés. Ce

fut le cas du phénomène qui a fini par être identifié sous le nom de mouvement brownien. En effet nous dit Hacking :

Je ne prétends pas qu'une observation valable se suffit à elle-même. De nombreux phénomènes soulèvent un grand intérêt puis sont laissés en friche parce que personne ne peut comprendre leur signification, comment ils se relient à autre chose ou comment ils peuvent être utilisés. En 1827, un botaniste, Robert Brown, fit un rapport sur le mouvement irrégulier du pollen en suspension dans l'eau. Le « mouvement brownien » avait été observé par d'autres au moins soixante ans auparavant, certains pensaient qu'il était dû à l'action du pollen lui-même, comme s'il avait été vivant. Brown effectua de difficiles et longues observations, mais sans résultat. C'est seulement au début de ce siècle que les travaux entrepris simultanément par des expérimentateurs, comme J. Perrin, et des théoriciens, comme Einstein, montrèrent que le pollen est agité en tous sens par des molécules. Ces résultats convertirent même les sceptiques les plus endurcis à la théorie cinétique des gaz. (Hacking, 1989, p. 259).

Il en fut de même des observations de A.-C. Becquerel en 1839 qui furent à l'origine de la théorie du photon et des applications pratiques qui s'ensuivirent. Toutefois, Hacking ne prétend pas que le travail expérimental pourrait se passer de théorie, mais seulement que la plupart des recherches vraiment fondamentales précèdent toute entreprise théorique (Hacking, 1989, p. 260).

En vérité, pour lui, autant certains travaux expérimentaux de grande portée proviennent intégralement de la théorie, autant certaines théories fondamentales sont totalement redevables aux expériences qui les précèdent. En effet, soutient-il, « certaines théories stagnent par manque de prise sur le monde réel, alors que certains phénomènes expérimentaux restent sans emploi par manque de théorie. » (Hacking, 1989, p. 260). Néanmoins, on peut aussi rencontrer ce que Hacking appelle des « familles heureuses » où théories et expériences s'harmonisent parfaitement. Afin d'illustrer son propos, il évoque l'expérience d'Arno Penzias et R.W. Wilson dans la moitié des années 1960 qui fut indépendamment confortée par un groupe de théoriciens de Princeton. D'où l'heureuse rencontre entre expérience et théorie qui ravit le philosophe. Voici *in extenso* l'histoire de cette convergence telle que relatée par le philosophe :

Les premières radiodiffusions transatlantiques présentaient toujours un bruit de fond assez important. De nombreuses sources de parasites avaient été identifiées, mais s'en



débarrasser était plus difficile. Certains de ces parasites étaient provoqués par des orages. Dans les années trente, déjà, Karl Jansky, dans les laboratoires de Bell Telephone, avait localisé un « sifflement » provenant du centre de la Voie lactée. Ainsi, il y avait dans l'espace des sources d'ondes radio qui s'ajoutaient aux parasites habituels.

En 1965, les radioastronomes Arno Penzias et R.W. Wilson adaptèrent un radiotélescope pour étudier ce phénomène. Ils espéraient trouver des sources d'énergie et ils en trouvèrent. Mais ils étaient aussi très obstinés. Ils découvrirent une petite quantité d'énergie qui semblait être présente partout, uniformément répartie dans tout l'espace. Il semblait que tout ce qui dans l'espace n'était pas source d'énergie était à une température d'environ 4°K. Comme cela n'avait pas grand sens, ils firent tout leur possible pour découvrir des erreurs matérielles. Ils pensèrent, par exemple, qu'une partie des radiations pouvait provenir des pigeons qui nichaient sur leur télescope et ils passèrent quelques terribles moments à essayer de les chasser. Mais, une fois éliminée toute source possible de bruit, ils constatèrent que demeurait une température uniforme de 3°K. Ils hésitèrent à faire part de cette découverte parce que l'idée d'une radiation de fond complètement homogène leur semblait absurde. Heureusement, alors qu'ils venaient d'acquiescer la conviction que ce phénomène absurde était bien réel, un groupe de théoriciens de Princeton fit circuler un texte suggérant, chiffres à l'appui, que si l'univers est issu du Big Bang, alors il doit y avoir une température uniforme partout présente dans l'espace, la température résiduelle de la première explosion. Plus encore, la théorie prévoyait que cette énergie serait détectée sous forme de signaux radio. Le travail expérimental de Penzias et Wilson se trouvait merveilleusement en prise avec ce qui serait autrement resté pure spéculation. Penzias et Wilson avaient montré que la température de l'univers est à peu près partout supérieure de 3° au zéro absolu, et qu'il s'agissait de l'énergie résiduelle de la création. Ce fut la première preuve vraiment convaincante du Big Bang. (Hacking, 1989, p. 260-261).

De cette expérience, Hacking retiendra qu'elle constitue le modèle type de ce qu'il appelle la « famille heureuse » et qui se situe en quelque sorte au confluent de la théorie et de l'observation habile. En revanche, il déplore le fait qu'il y ait dérive constante de l'histoire et du folklore populaire, comme en atteste, entre autres, la manière dont l'histoire de la découverte du muon et du méson a pu être totalement réécrite. En effet, dit-il :

Deux équipes de chercheurs détectent le muon après étude des rayons cosmiques en chambre de Wilson et utilisation de la théorie des gerbes cascades de Bethe-Heitler. L'histoire voudrait maintenant qu'ils aient tenté de trouver le « méson » de Yukawa et pensaient à tort l'avoir trouvé, alors qu'en fait ils n'avaient jamais entendu parler de l'hypothèse de Yukawa. Mon intention n'est pas de faire remarquer qu'un historien des sciences compétent est aussi capable d'écrire des choses fausses, mais plutôt de montrer la dérive constante de l'histoire et du folklore populaires. (Hacking, 1989, p. 263).

Dans le domaine de la réécriture de l'histoire, il semble que le théoricien Ampère soit une bonne illustration au service de la thèse de Hacking. En effet, le physicien



du XIX<sup>e</sup> siècle commence à travailler sur des bases théoriques, convaincu en bon kantien que la science théorique doit consister en l'étude des noumènes qu'il suppose derrière les phénomènes. Seulement, même si Kant ne voyait pas tout à fait les choses ainsi, les travaux d'Ampère connurent un revirement radical après qu'il eut assisté à la démonstration d'Ersted du 11 septembre 1820 à l'occasion de laquelle celui-ci fit dévier l'aiguille d'un compas à l'aide d'un courant électrique. Selon la relation qu'en fit Hacking, neuf jours plus tard, Ampère mit en place, au cours de ses conférences hebdomadaires, les fondements de la théorie électromagnétique qu'il semblait découvrir au fur et à mesure de ses investigations, du moins, si l'on en croit l'histoire officielle. Cependant, ainsi que le révèle C.W.F. Everitt, appelé à la rescousse par Hacking, il doit y avoir plus que cela, puisqu'Ampère, dépourvu de méthodologie post-kantienne authentique tentait d'y remédier par ses travaux. Pour Hacking, c'est tout de même celui qu'il qualifie de « grand théoricien expérimentateur de l'électromagnétisme » (Hacking, 1989, p. 265), James C. Maxwell, qui leva certaines équivoques relatives à l'image de théoricien pur et dur attribuée à Ampère. À ce propos, comparant le « déductiviste » Ampère à l'« inductiviste » Faraday, Maxwell aurait dit des travaux du premier qu'il s'agirait de :

(...) « l'un des résultats les plus remarquables de la science... parfait dans la forme, d'une précision inattaquable... résumé en une formule à partir de laquelle tous les phénomènes peuvent être déduits ». Mais il ajoute ensuite qu'alors que les comptes rendus de Faraday révèlent avec candeur tous les méandres parcourus par son esprit, il nous est difficile de croire qu'Ampère a vraiment découvert la loi de l'interaction au moyen des expériences qu'il décrit. Nous en venons à suspecter, ce qu'en vérité il nous dit lui-même, qu'il découvrit la loi par quelque processus qu'il nous cache et qu'ensuite, après avoir construit une démonstration parfaite, il enleva toute trace de l'échafaudage. (Hacking, 1983, p. 265).

Après avoir exposé et analysé cette diversité d'exemples tirés de l'histoire des sciences afin de souligner le caractère central de l'expérience dans l'entreprise scientifique, Hacking s'intéresse plus spécifiquement à l'invention comme expérience. Il se lance alors à l'exploration d'une variété de théories. Selon lui cependant, toute question posée en termes de théorie et d'expérience serait trompeuse puisqu'elle traiterait illégitimement théorie et expérience comme deux

entités relativement distinctes et uniformes. Il classe l'intervention parmi les différentes sortes d'expériences et en veut pour preuve l'histoire de la thermodynamique. De son avis :

L'histoire de la thermodynamique est l'histoire d'inventions pratiques qui mènent graduellement à l'analyse théorique. Le développement de technologies nouvelles peut passer par l'élaboration de théories et d'expériences qui sont ensuite appliquées à des problèmes pratiques. Mais il existe une autre voie où l'invention procédant à son propre rythme, laisse la théorie s'essouffler sur le côté. L'exemple le plus évident est aussi le meilleur : la machine à vapeur. (Hacking, 1989, p. 266)

L'analyse de cette invention révèle que trois étapes ainsi que de nombreux concepts expérimentaux furent nécessaires pour lui donner forme. Il s'agit notamment de la découverte de la machine à haute pression de Trevithick, le tout complété par le concept de « rendement » appartenant tant à l'économie qu'à la physique et qui résultait du rapport de la quantité de pieds-livres d'eau pompée par boisseau de charbon.

Le rôle attribué ici à l'invention se rapproche beaucoup de celui que pourrait avoir l'invention de brouettes, de guitares, de sigles ou autres fantaisies de nanotechnologues à l'échelle nanométrique. L'on s'entend que ces créations n'auraient pas grand sens si elles ne servaient pas d'une manière ou d'une autre une forme d'expérimentation. L'avenir nous dira certainement jusqu'à quel point elles ont servi la théorisation autour des nanos.

Comme le précise bien Hacking, la théorie ne précède pas toujours l'expérience. Il arrive que celle-ci se développe indépendamment de la théorie dont elle peut attendre longtemps parfois l'explication. Ainsi, en invoquant le livre de N.F. Mottet et H. Jones intitulé *Theory of the Properties of Metals and Alloys* paru en 1936, Hacking établit, en s'appuyant sur leurs thèses, qu'une théorie de la conduction devrait pouvoir expliquer (1) la loi dite de Wiedemann-Franz (1853), (2) la parfaite conductibilité d'un métal pur et le fait que celle-ci dépende de la place du métal en question dans la table périodique (1890), (3) les augmentations de résistance

constatées dans les solutions solides affectées par de petites quantités d'impuretés et la règle de Matthiessen (1862) sur le changement de résistance indépendant de la température provoqué par la présence de petites quantités de métal dans une solution solide, puis (4) le lien entre résistance, température et pression, enfin (5) l'apparence de la supraconductibilité (1911). Selon Mott et Jones, à l'exclusion de ce dernier point qui ne sera expliqué qu'en 1957, la théorie de la conductibilité issue de la mécanique quantique a permis, au moins, d'avoir une compréhension qualitative de ces résultats. Hacking note que les résultats expérimentaux de cette liste étaient acquis longtemps avant qu'une théorie n'ait pu permettre de les rassembler. Ainsi dit-il :

Toutes les données étaient là, manquait une théorie qui les articule. Dans ce domaine, contrairement à ce qui s'est passé dans la thermodynamique ou l'optique, la théorie n'est pas venue directement des données, mais plutôt d'intuitions beaucoup plus générales sur la structure atomique. La mécanique quantique fournit à la fois le problème et la réponse. Personne ne peut raisonnablement suggérer que l'organisation des lois phénoménologiques à l'intérieur d'une théorie générale est une simple question d'induction, d'analogie ou de généralisation. La théorie s'est finalement avérée décisive pour le savoir, la croissance du savoir et ses applications. Cela dit, évitons de prétendre que, pour être connues, les diverses lois phénoménologiques de la physique des solides avaient besoin de la première théorie venue. Nombreuses sont les voies de l'expérimentation. (Hacking, 1983, p. 270).

Avant de passer à la question de l'observation qui fait suite à l'analyse des relations complexes qui existent entre théorie et expérience, Hacking nous dit qu'il a bien conscience du problème que pose la multiplication des exemples qu'il a exposés puisqu'il peut sembler impossible d'en produire un énoncé général. Mais, pour lui, c'est déjà un résultat, puisque toute conception partielle de l'expérience ne peut être qu'erronée (Hacking, 1989, p. 270-271). Portons notre attention maintenant sur la question de l'observation et de ce que nous appelons la « techno-observation » qui recourt à des technologies de toute sorte dans le but d'appréhender les phénomènes. Ce sous-chapitre apportera un éclairage sous un nouvel angle du lien entre théorie et expérience, notamment à travers la problématique de la vision « naturelle » *versus* celle de la vision au microscope.

### 5.2.2. De l'observation à la techno-observation

Selon Hacking, en matière d'observation même les faits les plus notoires semblent avoir été affectés par deux modes philosophiques distinctes, notamment celle de ce que Quine qualifie d'« ascendant sémantique » qui invite à ne se consacrer qu'aux seuls énoncés sur l'observation, aux mots utilisés pour parler des choses ; et celle de la domination de la théorie par l'expérience qui prétend que tout énoncé sur l'observation porte sa charge de théorie qui la précède toujours. Le philosophe de l'intervention pense alors à commencer l'examen de la question de l'observation par six postulats qu'il considère comme des évidences non théoriques et non linguistiques. Le premier est que l'observation, bien qu'ayant toujours été considérée comme partie intégrante des sciences expérimentales, n'a jamais été considérée comme jouant un rôle important. Hacking précise qu'ici il ne parle que de l'observation telle que les philosophes la voient, c'est-à-dire en s'imaginant à tort que l'expérimentateur passerait sa vie à faire des observations dans le but de fournir à la théorie les données nécessaires à sa vérification ou à son édification. Le second type d'observation plus important et moins remarqué, bien qu'essentiel à toute bonne expérimentation selon Hacking, prend pour acquis le fait que le bon expérimentateur serait celui qui sait noter le défaut révélateur ou l'issue inattendue du fonctionnement des différentes parties du dispositif expérimental qui serait inutilisable sans l'œil exercé d'un bon observateur. Parfois, c'est l'attention persistante consacrée par ce dernier à une anomalie qui mène à un savoir nouveau. Le sens donné au mot « observation » ici est plus proche du sens commun que du sens philosophique mentionné plus haut. Le troisième considère que certaines observations de valeur sont essentielles pour le lancement d'une enquête sans nécessairement influencer de façon significative les travaux ultérieurs. Dans ce cas, soutient Hacking, « l'expérience succède à l'observation pure. » (Hacking, 1989, p. 274). Le quatrième tient l'habileté à observer pour un don qu'il est souvent possible d'améliorer par l'entraînement et la pratique. Le cinquième prend en compte le fait qu'un très grand nombre de rapports d'observation précèdent la théorie, même s'ils apparaissent rarement dans les annales scientifiques. Et, le



sixième veut que nous nous servions très souvent d'instruments pour observer les objets et les événements, étant entendu que dans la science que nous connaissons, il est rare de voir sans l'assistance des instruments. En effet, « l'observation contient l'idée de « voir à l'œil nu », mais les scientifiques la limitent rarement à cela. » (Hacking, 1989, p. 275). De plus, l'instrument comporte une dimension technologique indéniable qui en accroît à la fois la complexité, la portée et la précision. Le microscope à effet tunnel et ceux qui s'en sont inspirés en constituent des exemples patents.

Pour Hacking, l'observation a été surévaluée. Il en reporte la faute sur le positivisme, puisque, avant l'existence de ce courant, l'observation n'était pas tenue pour décisive. Il en veut pour preuve le fait que Francis Bacon lui-même, précurseur des sciences inductives, n'utilise pas le mot dans son œuvre, même si à son époque son usage fut courant. Mais, précise Hacking, dès son origine, le concept d'observation fut associé à l'utilisation d'instruments et portait surtout sur la mesure de la distance des corps célestes comme le soleil. Au concept d'observation, Bacon préférait celui traduit par « instances prérogatives » dont il avait identifié vingt-sept parmi lesquelles il y avait ce que nous connaissons aujourd'hui sous le nom d'« expérience cruciale ». De ces différentes sortes d'instances, certaines sont des expériences préthéoriques notables, d'autres sont enclines à vérifier la théorie, alors qu'une dernière partie effectue ses activités en s'appuyant sur des dispositifs vraisemblablement technologiques qui « aident à l'action immédiate des sens ». Il s'agissait notamment des nouveaux microscopes, de la lunette de Galilée, ainsi que des mires, astrolabes et bien d'autres objets qui rectifient et dirigent le sens de la vue. À ces catégories d'instances baconiennes, il faudrait ajouter celle qui concerne les dispositifs permettant de traiter d'événements non-sensibles en les réduisant au sensible, autrement dit, selon ces mots du *Novum Organum* cités par Hacking : « en rendant manifestes des choses qui ne sont pas directement perceptibles au moyen d'autres qui le sont ». On voit donc que le père de l'inductivisme est bien conscient de la différence entre le directement perceptible et l'invisible à l'œil nu qui ne peut être qu'évoqué, mais pour Hacking, cette distinction est à la fois évidente et sans

importance pour Bacon. La surévaluation de l'observation ne viendrait vraisemblablement pas de là, mais le philosophe canadien croit avoir rassemblé un certain nombre d'indices susceptibles de la faire remonter au tout début du XIX<sup>e</sup> siècle, après l'an 1800, lorsque le mot « voir » a pris un sens tout différent en devenant synonyme de voir la surface opaque des choses dont devrait dériver tout savoir, depuis lors. Ce changement de conception constituerait, de l'avis de Hacking, le point de départ tant du positivisme que de la phénoménologie.

#### 5.2.2.1. De l'observation

La conception positiviste de l'observation est liée, on le sait, à cette vision du réel qui veut qu'il se réduise à ce qui est observable. Les positivistes logiques, nous rappelle Hacking, rêvaient même de faire des énoncés théoriques une sténographie des faits tout en organisant les pensées concernant l'observable. Selon le philosophe de l'intervention, une autre version de la réduction logique, les termes se référant aux entités théoriques ne présenteraient pas du tout la structure logique des termes de référence. Du coup, ces termes ne réfèrent à rien et les entités théoriques elles-mêmes sont dépourvues de réalité. Un tel réductionnisme déboucherait sur un antiréalisme assez strict d'avec lequel Hacking prend ses distances prétendant qu'un tel débat est vide de sens puisque la réduction logique d'une science digne de ce nom n'a jamais été accomplie par personne. D'où, selon lui, le revirement du positivisme qui se met à dire avec Comte ou van Fraassen que même s'il faut comprendre littéralement les énoncés théoriques, nous devons nous garder de les croire. Aussi, affirme-t-il :

Comme le dit van Fraassen dans *The Scientific Image* : « Quand un scientifique propose une nouvelle théorie, le réaliste considère qu'il revendique la vérité de ce postulat. L'antiréaliste, lui, considère seulement qu'il expose cette théorie, la rend publique, en l'état, et lui accorde certaines vertus » (p. 27). Une théorie peut être acceptée parce qu'elle rend compte de phénomènes et aide à la prédiction. On peut l'accepter pour sa valeur pratique sans croire pour autant qu'elle est littéralement vraie.

Des positivistes tels que Comte, Mach, Carnap ou van Fraassen prennent tous les chemins ci-dessus pour affirmer avec insistance qu'il y a une différence entre la théorie et l'observation. C'est ainsi qu'ils protègent le monde des ravages de la métaphysique. (Hacking, 1983, p. 177).

Mais, pour Hacking, l'importance accordée à la distinction entre observation et théorie était excessive et a été critiquée sous deux angles. Le premier qu'il qualifie de conservateur de tendance réaliste pourrait être représenté par Grover Maxwell qui en 1962 trouvait que les frontières entre l'observable et le théorique sont floues, non pas à cause de la constitution du monde, mais plutôt du fait que les techniques utilisées ne sont pas tout à fait adaptées. Toutefois, précise-t-il, cette démarcation perd de son importance dès qu'il s'agit de sciences expérimentales et ne saurait servir pour dire qu'une entité théorique existe vraiment ou non. Maxwell soutient l'insuffisance du critère d'observabilité parce que certaines choses, comme les gènes, autrefois totalement théoriques sont devenues des entités tout à fait observables, grâce notamment aux progrès technologiques réalisés sur les microscopes. Il soutient, en effet, « qu'il existe un mouvement continu qui commence avec la vision dans le vide, passe par la vision dans l'atmosphère puis par la vision au microscope optique pour se prolonger aujourd'hui par la vision au microscope électronique. » (Hacking, 1989, p. 278). Bien qu'ayant quelque réserve sur les techniques que Maxwell prendrait pour l'argent comptant, Hacking se dit d'accord avec sa tentative de réduire le rôle de la visibilité comme critère ontologique ainsi que le fait Dudley Shapere lorsqu'il note que les physiciens parlent souvent d'observer et de voir à l'aide d'instruments qui ne laissent aucune place ni à l'œil ni à un quelconque organe sensoriel qui y jouerait un rôle direct (Hacking, 1989, p. 278). Si nous reprenons la schématisation des différentes tendances dont il a été question ici, trois axes se dégagent. Le positivisme se caractériserait par l'importance donnée à la différence entre théorie et observation, le réalisme se distinguerait par sa réponse conservatrice qui consiste à prétendre qu'il n'existe pas de différence significative entre entités observables et inobservables, alors que l'idéalisme adopterait une réponse radicale qui voudrait que tout compte rendu d'observation portât une charge théorique.

Cette idée que chaque terme, chaque phrase observationnelle est lestée de théorie a été développée pour la première fois par Hanson en 1959, mais pour avoir un sens,

un énoncé d'observation n'a pas besoin d'être relié à une théorie particulière. En effet nous dit Hacking :

Certes, la phrase « c'est un positron », pas plus que la phrase « c'est un mouton », ne peut être considérée hors contexte. Je veux dire seulement que, pour avoir un sens, il n'est pas nécessaire qu'elle soit reliée à une théorie particulière, comme si chaque fois que l'on disait « c'est un positron » on se faisait d'une certaine manière l'avocat de cette théorie. (Hacking, 1989, p. 292).

Tout au long de la seconde partie de son ouvrage, il s'attelle à montrer qu'une partie non négligeable de l'histoire des sciences prouve que certaines observations cruciales ont pu être effectuées sans aucun concours de la théorie. Ce fut le cas de Herschel qui avait remarqué que la chaleur transmise par la lumière diffère selon la couleur et en fit un rapport qui se limitait aux strictes données sensorielles. Toutefois, il convient de préciser que Hacking ne sous-estime pas la thèse de Hanson selon laquelle voir ou remarquer un phénomène suppose que l'on détient d'abord une théorie qui lui donne sens, même s'il n'en pense pas moins que dans le cas de Herschel, c'est précisément l'absence de théorie qui l'a amené à faire ses remarques. Il admet que l'on tend effectivement à remarquer les choses qui nous paraissent intéressantes ou surprenantes, ce qui n'est pas sans influencer les théories que nous soutenons, mais il ne faut pas non plus « négliger la possibilité qu'émerge un pur observateur de talent, ni inférer trop facilement d'histoires comme celle du positron, que regarder une plaque photographique et dire « c'est un positron », c'est forcément impliquer ou soutenir toute une somme théorique. » (Hacking, 1989, p. 291). Selon lui, on peut parfaitement apprendre à de jeunes assistants à reconnaître les traces permettant de détecter la présence de positrons sans pour autant qu'ils ne connaissent quoi que ce soit de la théorie. Ainsi, même si des phrases comme « c'est un positron » ou « c'est un mouton » ne peuvent être considérées hors de leur contexte d'énonciation, pour qu'elles aient un sens, il n'est pas nécessaire qu'elles soient tributaires d'une théorie particulière (Hacking, 1989, p. 292).

D'un autre côté, Hacking n'est pas sans remarquer la tendance à la « logothéorie » en philosophie contemporaine avec une propension des philosophes à remplacer les



observations par des entités linguistiques, notamment des phrases sur l'observation.

Afin d'illustrer son propos, il soutient :

Ainsi, W.V.O. Quine propose, presque comme s'il s'agissait d'une nouveauté, qu'on « laisse tomber les discours sur l'observation pour parler plutôt des phrases sur l'observation, les phrases qui sont censées constituer le rapport d'observation » (*The Roots of Reference*, pp. 36-39). Caroline Herschel nous permet de réfuter cette assertion qu'observer c'est seulement faire des phrases, mais elle nous amène aussi à questionner les bases mêmes de l'affirmation de Quine. En ce qui concerne l'observation, ce dernier s'oppose assez explicitement à la doctrine de la charge théorique. Il existe, dit-il, une classe de phrases sur l'observation qui peut être parfaitement délimitée parce qu'« une observation est ce sur quoi des témoins se mettent spontanément d'accord ». Il nous assure qu'« une phrase est du domaine de l'observation pour autant que sa valeur de vérité puisse, en toute circonstance, être reconnue par tous, ou une majorité, des membres de la communauté des locuteurs ayant assisté à l'événement ». Et « l'appartenance à une communauté de locuteurs est reconnue par la simple capacité au dialogue courant ».

Il est difficile d'imaginer approche plus mal orientée de l'observation dans les sciences expérimentales. On n'aurait trouvé personne, dans la « communauté de locuteurs » de Caroline Herschel, qui aurait pu, après une seule nuit d'observation, être d'accord ou pas d'accord avec elle à propos d'une comète récemment découverte. Elle était la seule, à l'exception peut-être de William, à disposer du talent nécessaire. Certes, nous ne dirions pas qu'elle avait du talent si d'autres chercheurs, à l'aide d'autres moyens, n'avaient finalement confirmé nombre de ses découvertes. Ses jugements n'atteignent leur pleine validité que dans le contexte de l'intense vie scientifique de l'époque. Mais l'accord « spontané » de Quine a peu à voir avec l'observation scientifique. (Hacking, 1989, p. 294).

Pour le théoricien de l'intervention, l'approche quiniennne est trop réductrice et nous empêche d'avoir accès à l'ensemble de la vie scientifique. En conséquence, si nous voulons accéder à cette dernière, il nous recommande de procéder à l'inverse de Quine en troquant les discours sur les phrases d'observation par l'observation proprement dite. Une telle attitude impliquerait que nous abordions avec circonspection les rapports, les talents et les résultats expérimentaux. Par exemple, nous dit Hacking, nous devons nous interroger sur la nature d'une expérience qui marche suffisamment bien pour que l'expérimentateur de talent sache que les données qu'elle fournit ont quelque signification, sachant que l'observation n'a pas grand-chose à voir avec la manière dont on rend une expérience convaincante (Hacking, 1989, p. 295).

Sur le chemin qui mène vers le recours aux microscopes, Hacking note que sans assistance, l'œil ne voit pas assez loin et pas assez profond. Ainsi, certains d'entre nous ont besoin de lunette pour améliorer ou corriger leur vue, alors que des télescopes et des microscopes sont de plus en plus imaginatifs et ingénieux, nous permettant ainsi de repousser les limites des sens. Il existe cependant de plus radicales conceptions de la notion d'observation dans certaines sphères des sciences expérimentales, notamment celle qui consiste à dire que l'on observe ce que le commun des mortels croit inobservable, c'est-à-dire imperceptible par les cinq sens quasiment sans assistance. Dans le cas des travaux autour du soleil, par exemple, il évoque Dudley Shapere qui faisait remarquer le fait que la possibilité, ou l'impossibilité, d'observer un objet dépend de l'état du savoir au moment où l'observation est effectuée. Hacking qualifie ces moments d'« observation à charge théorique massive » nécessitant une quantité énorme de théories afin que le travail des récepteurs ou la transmission d'informations par les neutrinos soit possible. À titre d'exemple, il estime qu'il existe une excellente raison de parler d'observation en ce qui concerne les neutrinos et le soleil. Shapere fait remarquer que la possibilité, ou l'impossibilité, d'observer un objet dépend de l'état du savoir au moment où l'observation est effectuée. Le travail des récepteurs ou la transmission d'informations par les neutrinos suppose que l'on dispose de quantités énormes de théories. Aussi pourrions-nous penser que plus la théorie avance et plus nous étendons le royaume de ce que nous appelons l'observation. Mais il nous faut prendre garde à ne pas parler de théorie de manière trop générale. Une excellente raison de parler d'observation en ce qui concerne les neutrinos et le soleil. En effet, selon lui, la théorie des neutrinos et de leurs interactions est presque complètement indépendante des spéculations sur le noyau solaire, et c'est ce manque d'unité de la science qui nous permet d'observer en déployant toute une armée d'hypothèses théoriques un autre aspect de la nature sur lequel nous avons un tas d'idées sans lien. « Bien sûr, ajoute-t-il, que les deux domaines soient reliés ou non implique aussi l'existence, non pas exactement d'une théorie, mais au moins d'un pressentiment sur la nature de la nature. » (Hacking, 1989, p. 298).

De l'analyse du philosophe canadien, cependant, il ressort que Shapere a une intention plus philosophique lorsqu'il parle d'observation, puisqu'il soutient l'idée que l'ancienne conception fondamentaliste du savoir avait du vrai, car, contrairement à ce qui se passe en nanotechnosciences où il est plutôt question de manipulation et d'images haptiques, le savoir est bien fondé sur l'observation. Mais, celle-ci dépend de nos théories sur le monde et sur certains effets spéciaux. De ce fait, on ne peut dire d'une phrase qu'elle est absolument fondamentale ou purement observationnelle. Toutefois, prévient Hacking, le fait que l'observation dépende de la théorie n'autorise aucune des conséquences antirationnelles parfois présentées par la thèse selon laquelle toute observation aurait une charge théorique. Il rapporte que même s'il concède que Shapere nous ait donné la meilleure et la plus complète étude sur l'observation, il ne put faire l'économie de la question des fondements et de la rationalité des croyances théoriques. Lui faisant écho, van Fraassen fait remarquer, avec des objectifs différents et une conception du réel comme quelque chose d'observationnel tout en accordant à la théorie la possibilité de modifier nos croyances sur l'observation et le réel, que la théorie peut délimiter les frontières de l'observation. En nanotechnoscience, bien entendu, le problème ne semble pas se poser dans les mêmes termes, puisqu'observer, c'est déjà manipuler, et donc, constater les résultats, les effets, de la manipulation initiée afin de « voir » pour comprendre, expliquer et agir. Il convient à présent de voir ce que Ian Hacking nous dit du microscope, mais auparavant tentons de répondre avec lui à une question préalable sur la production des appareils. En effet, pourquoi produisons-nous des appareils ? Quel est le but de nos instruments ?

#### 5.2.2.2. ... à la techno-observation

Par techno-observation nous entendons toute observation au sens large technologiquement implémentée. Selon Hacking, il existe plusieurs façons de fabriquer des instruments utilisant les propriétés causales des électrons afin de produire avec une haute précision certains effets souhaités. L'argument, qu'il



qualifie d'expérimental en faveur de son réalisme, ne tient pas en ce que les résultats concluants obtenus sont déduits de la réalité des électrons. Pour lui :

On ne fabrique pas des instruments pour en déduire la réalité des électrons, comme si l'on soumettait une hypothèse à l'examen pour y croire ensuite si l'examen s'avère positif. Ce serait faire erreur de chronologie. À l'heure actuelle, nous concevons des appareils reposant sur un petit nombre de vérités simples à propos des électrons, afin de produire quelque autre phénomène que nous souhaitons étudier. (Hacking, 1989, p. 424).

D'après ce que nous avons vu sur les nanoscopes, cette conception sur les instruments pourrait parfaitement leur convenir, même si dans la réflexion développée dans *Representing and Intervening* (1983), il n'y a aucune mention ni allusion au microscope à effet tunnel qui, pourtant, a été inventé deux ans avant la publication de cet ouvrage. Il faut croire que l'auteur n'était pas au courant de la mise au point de ce nouvel instrument qui est en train de révolutionner les pratiques scientifiotechnologiques tout en bouleversant les frontières traditionnellement convenues entre science et technologie, nature et artefact, théorie et pratique, observation et manipulation... Néanmoins, de l'analyse qu'il propose, il ressort que supprimer les anomalies ne signifie pas les expliquer ou les prévoir en terme de théorie, tout comme croire en l'électron ne permet pas de prévoir le comportement d'un appareil. Dans cette optique, Hacking pense que nous ne disposons que d'un certain nombre d'idées générales sur la façon de préparer nos échantillons ou des électrons polarisés dans le cas qui l'intéresse, mais nous passons beaucoup de temps à construire des prototypes qui ne fonctionnent pas et nous nous empêtrons dans d'innombrables erreurs aussi. Que de pistes avons-nous été obligés d'abandonner afin de tenter de nouvelles approches. La suppression des anomalies n'est donc pas synonyme de les expliquer ou de les théoriser, mais elle permet de se débarrasser du « bruit », de « ces événements qu'aucune théorie ne permet de comprendre » et qui affectent l'appareil. Ainsi, le rôle assigné à l'instrument ici est d'être capable d'isoler les propriétés de l'entité que nous voulons utiliser tout en réduisant tous les autres effets qui pourraient être gênants (Hacking, 1989, p. 424). Pour illustrer ses propos, Hacking soutient que :



Bain avait sûrement raison il y a un siècle. Les présomptions concernant la structure intime de la matière ne pouvaient alors être prouvées. La seule preuve ne pouvait être qu'indirecte, à savoir que les hypothèses semblaient fournir quelques explications et permettaient de faire des prédictions satisfaisantes. De telles inférences n'ont jamais convaincu les philosophes sympathisants de l'instrumentalisme ou de quelque autre forme d'idéalisme.

De fait, la situation est assez semblable à celle de l'épistémologie au XVII<sup>e</sup> siècle. À l'époque, était « savoir » ce qui représentait correctement. Mais alors il était impossible de sortir des représentations pour s'assurer qu'elles correspondaient bien au monde. Chaque vérification de représentation est aussi représentation. « Rien de plus proche d'une idée qu'une autre idée », disait l'évêque Berkeley. Essayer de défendre le réalisme scientifique au niveau de la théorie, de la vérification, de l'explication, des succès de prédiction, des convergences de théories et ainsi de suite, c'est s'enfermer dans un monde de représentations. Pas étonnant que l'anti-réalisme scientifique soit si constamment d'actualité. Il n'est qu'une variante de la « théorie du savoir comme spectacle ». (Hacking, 1989, p. 436-437).

D'autre part, alors qu'au début du XX<sup>e</sup> nombre de scientifiques devinrent réalistes à propos des atomes, Hacking note que ce ne fut pas le cas des philosophes. En effet, malgré ces changements au sein de la communauté scientifique de l'époque, certains antiréalistes de l'instrumentalisme ou du fictionnalisme continuaient à être très influents entre 1910 et 1930. D'où l'idée qu'il fallait ne penser qu'à la pratique en faisant fi de la théorie. Il semble que l'antiréalisme à propos des atomes de même que celui concernant les entités inframicroscopiques furent très répandus à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Mais les choses ont changé, et la preuve directe de l'existence des électrons est notre capacité actuelle à les manipuler grâce à des propriétés causales bien comprises et parfaitement maîtrisées. Cela ne signifie pas, bien entendu, que pour le philosophe de l'intervention la réalité se compose seulement de ce qui est humainement accessible (Hacking, 1989, p. 437). Il paraît évident qu'en restant dans cet ordre d'idée, les nanotechnosciences sont du pain béni pour le réalisme défendu par Hacking puisque l'une des conditions *sine qua non* de l'activité nanotechnoscientifique est non l'observabilité au sens strict, mais la manipulabilité.

Un autre élément au service du réalisme interventionniste repose sur la mesure et sur l'idée que la réalité est plus grande que nous. Pour le philosophe canadien, commencer à mesurer ou comprendre les pouvoirs de causalité d'une entité postulée

ou inférée est la meilleure preuve susceptible d'attester de sa réalité. En retour, ajoute-t-il :

(...), la meilleure preuve que nous ayons de cette sorte de compréhension c'est que nous pouvons entreprendre de construire, à partir de rien, des machines suffisamment fiables en prenant avantage de telle ou telle relation causale. Ainsi, c'est la technique, et non la théorie, qui fournit la meilleure preuve du réalisme scientifique à propos des entités. L'attaque que je porte contre l'antiréalisme scientifique est comparable à la lutte que Marx mena contre l'idéalisme de son temps. Dans les deux cas, l'essentiel n'est pas de comprendre le monde, mais de le transformer. Sans doute, en théorie, existe-t-il certaines entités que seule la théorie nous permet de connaître (les trous noirs). Alors notre preuve est semblable à celle de Lorentz. Peut-être existe-t-il des entités que nous mesurerons et n'utiliserons pourtant jamais. L'argument expérimental en faveur du réalisme ne dit pas que seuls les objets de l'expérimentateur existent. (Hacking, 1989, p. 438).

Ainsi, la technique, en plus de fournir la meilleure preuve du réalisme, est indissociable des technosciences, *a fortiori* des nanotechnosciences. C'est une des raisons pour lesquelles nous pensons que toute philosophie qui en fait abstraction ou qui la néglige peinerait à se définir comme philosophie des nanotechnosciences, voire de la science contemporaine du fait de leur nature résolument hybride. C'est pourquoi les philosophes dont nous avons examiné les thèses jusqu'ici, notamment Kuhn, Lakatos et Robert, ont du mal à suivre l'évolution scientifique par le truchement des nanotechnosciences puisque celles-ci déjouent l'idéal représentationnaliste. Leurs philosophies auraient donc besoin du correctionnisme de Serge Robert qui doit, lui-même, s'appliquer sa propre méthode afin de répondre aux nouvelles exigences d'un savoir ouvertement porté par les technologies et d'une certaine façon, incarné par celles-ci, voire rendu possible grâce à elles. À l'instar de Cartwright, Hacking pense, néanmoins, que la théorie en tant que telle n'est pas porteuse de vérité tout en constituant une représentation qui nous aide à penser, et que la vérité, si elle est à notre portée, est dans les approximations plutôt que dans la théorie sous-jacente (Hacking, 1989, p. 352). Avant d'en finir avec l'alternative que propose l'interventionnisme, venons-en à présent au microscope, tel que nous l'avions annoncé.

Tout d'abord, il convient de préciser que lorsque Hacking parle de microscope, il n'est nullement question pour lui de microscope à effet tunnel (*STM*), encore moins de microscope à force atomique (*AFM*). D'ailleurs comme il le rapporte lui-même en parlant d'un de ses professeurs, technicien du microscope, quand il écrivait son livre sur la représentation et l'intervention, c'était la microscopie par diffraction de rayons X qui fut la principale interface entre la structure atomique et l'esprit humain. Pour lui, les philosophes des sciences qui débattent du réalisme et de l'antiréalisme devraient apprendre à connaître un peu mieux les instruments. Sous sa plume, le microscope optique prend l'attribut de « merveille des merveilles » dont peu de gens connaissent le fonctionnement, mis à part les initiés. Selon lui, le microscope est un autre moyen de découvrir le réel dont il convient d'interroger la manière dont il y arrive. C'est l'objectif qui motive l'intrusion de Hacking dans le domaine des microscopistes dont il dit qu'ils disposent « de trucs qui étonnerait le plus imaginaire des spécialistes de la philosophie de la perception. » (Hacking, 1989, p. 304). Il affirme qu'avoir quelque compréhension de ce qu'il appelle d'« extraordinaires systèmes physiques » dont le pouvoir grossissant, nous permettrait de voir plus que tout ce que l'on n'a jamais pu voir auparavant dans le monde.

Au fond, nous dit-il, voir au microscope n'est ni chose banale, ni chose évidente. Car, contrairement à ce que l'on pourrait croire, il ne suffit pas d'examiner au travers, mais il faut aussi interférer. En effet, il ne suffit pas de regarder dedans pour voir, et un philosophe qui n'aura pas appris à en utiliser plusieurs sera dans l'incapacité d'en apprécier la portée. Il risquerait d'être tellement désarmé qu'il aurait du mal à distinguer le reflet de son œil d'une imperfection de la lentille ou de l'échantillon dessous. Il serait donc incapable de distinguer un grain de poussière d'une glande salivaire de mouche à fruit à moins d'avoir appris au préalable à disséquer ces mouches sous un microscope à faible grossissement, soutient Hacking (1989, p. 308). Il pense que la première leçon pour regarder au microscope, c'est d'apprendre à faire plutôt que de se contenter d'ouvrir les yeux. C'est une règle qui vaut bien pour les nanoscopes, même si des logiciels de plus en plus performants permettent de rendre l'image on ne peut plus conforme à l'objet auquel elle se

confond pour en être, non plus la représentation, mais la présentation non-distanciée. Berkeley ferait écho à cette idée dans *Theory of Vision* (1710) où il défend l'idée que la vision tridimensionnelle ne s'acquiert qu'après que nous avons appris à nous déplacer et à intervenir dans le monde. Le sens du toucher serait associé à l'image rétinale bidimensionnelle dont le rapport de l'un à l'autre une fois acquis produit la perception tridimensionnelle, tout comme nager est nécessaire pour un plongeur afin d'apprendre à voir en milieu marin. De l'avis du philosophe interventionniste, peu importe que Berkeley ait raison ou pas en ce qui concerne la vision primaire, puisque de toute façon, l'acquisition après l'enfance de nouveaux modes de visions implique d'apprendre en faisant et non en se limitant à regarder passivement. Il paraît aller de soi que la conviction qu'une partie de la cellule est bien là, telle qu'on se l'imagine, est renforcée quand on réussit à lui micro-injecter un fluide à un endroit bien précis, à l'aide de moyens physiques bien concrets (Hacking, 1989, p. 308-309).

D'autre part, se référant au livre d'E.M. Slayter (1970) intitulé *Optical Methods in Biology*, Hacking se pose la question de l'identité de l'image à l'objet en donnant l'exemple du microscopiste qui en observant un objet familier au microscope à faible puissance peut voir une image légèrement agrandie, mais « identique » à l'objet. Lorsque le grossissement est augmenté, on peut s'apercevoir que l'objet comporte d'autres détails imperceptibles à l'œil nu dont on suppose naturellement qu'ils sont aussi « identiques » à l'objet. Bien entendu, il convient toujours de s'assurer que les détails révélés par le grossissement ne résultent pas d'une contamination du spécimen lors de sa préparation en vue de l'observation au microscope. Mais, à la question : « que veut-on dire vraiment quand on dit que "l'image est identique à l'objet" ? » (Hacking, 1989, p. 310). Hacking expose la réponse de Slayter qui pose d'emblée l'idée que l'image n'est qu'un pur effet d'optique. Pour lui, l'identité entre objet et image en fait une identité entre les interactions physiques avec le faisceau lumineux qui rendent l'objet visible à l'œil et celles qui concourent à la formation d'une image dans le microscope. Cependant, il émet la réserve selon laquelle, si le rayonnement utilisé dans le but de former



l'image est un faisceau d'ultraviolets, de rayons X ou d'électrons, ou encore que le microscope est équipé d'un dispositif capable de convertir les différences de phase en variations d'intensité, les images ainsi générées ne seront alors en aucun cas identiques à l'objet, même dans le sens restreint qu'il vient de définir, du fait que l'œil ne serait pas en mesure de percevoir les ultraviolets, les rayons X ou le rayonnement électronique, encore moins de détecter des changements de phase entre les rayons lumineux.

Compte tenu de ce que nous avons dit précédemment sur les nanotechnosciences et l'image (Cf. sous-chapitre 2.4, notamment), il apparaît clairement que le microscope à effet tunnel est une autre limite que nous pouvons opposer à cette thèse puisque dans le cas d'espèce l'image est plus qu'une représentation, c'est à la fois ce que l'on voit, ce que l'on manipule et ce que l'on modifie. Peu importe que l'œil perçoive les rayons X, les ultraviolets ou la rugosité des atomes, si nous concédons la possibilité que ce raisonnement puisse amener à considérer l'image comme la carte des interactions entre le spécimen et le rayonnement produisant l'image de ce dont il est question. Hacking trouve que sur ce thème, deux visions s'affrontent. La (A) héritée d'un président de la *Royal Microscopical Society*, stipulait qu'en aucun cas l'on ne voit avec un microscope ; alors que la (B) portée notamment par Slayter soutient exactement le contraire en acceptant de dire que l'on voit au microscope, mais « seulement si les conditions d'interaction physique du spécimen et du rayon lumineux sont « identiques » à celles que l'on rencontre dans la vision normale. » (Hacking, 1989, p. 310-311). La première vision s'appuie sur les recherches de Abbe démontrant que la vision microscopique est *sui generis* et que par conséquent, il ne saurait y avoir de comparaison entre la vision microscopique et macroscopique. En effet, étant donné qu'il n'y a pas de commune mesure entre les images d'objets ordinaires qui ne sont pas produites par les lois ordinaires de la réfraction et celles qui ne sont pas le produit de la dioptrique, mais dépendent exclusivement des lois de la diffraction. Ainsi, nous dit Hacking :

Les microscopistes (A) et (B), qui ne sont pas d'accord sur le plus simple microscope optique, peuvent-ils être sur la bonne voie philosophique en ce qui concerne l'acte de « voir » ? La prudence des propos sur l'« image » et le « vrai » suggère plus d'ambivalence dans la conception de (B). On doit particulièrement se méfier du mot « image » en microscopie. Il dénote parfois une chose que l'on peut montrer du doigt, une forme portée sur un écran, une micrographie ou autre, mais parfois il semble directement désigner les entrées qui se présentent à l'œil. C'est l'optique géométrique qui est à l'origine du conflit, car l'on y fait le diagramme d'un système en plaçant le spécimen sous un certain plan focal et une « image » sous un autre, l'image servant à indiquer ce que l'on verra si l'on met l'œil au microscope. Je résiste cependant à une inférence que même la citation (B) pourrait nous amener à tirer. On dira que tout énoncé concernant ce qui est vu au microscope est imprégné de théorie : imprégné des théories de l'optique ou des théories concernant d'autres ondes. Ce n'est pas mon avis. On a besoin de la théorie pour produire un microscope. On n'en a pas besoin pour l'utiliser. La théorie peut aider à comprendre pourquoi les objets perçus au microscope à interférence du contraste sont entourés de franges asymétriques, mais c'est assez empiriquement que l'on apprend à ne pas en tenir compte. Ce que savent les biologistes de l'optique ne suffirait guère à un physicien. La pratique - je veux dire de manière générale faire et non regarder - crée la faculté de distinguer entre un artefact visiblement produit par la préparation ou l'instrument et la structure réelle qui est vue au microscope. C'est cette faculté pratique qui engendre la conviction. Elle exige que l'on sache un peu de biologie, même s'il est vrai que l'on trouve des techniciens de premier ordre qui ne connaissent rien à la biologie. Mais la physique ne joue strictement aucun rôle dans la compréhension de la réalité microscopique du biologiste. Les observations et manipulations de ce dernier sont rarement imprégnées de théorie physique et ce qu'il pourrait trouver dans ces théories n'a rien à voir avec les cellules de cristaux qu'il étudie. (Hacking, 1989, p. 311-312).

Cette intuition de Hacking se retrouve chez Daston et Galison (2012), mais cette fois-ci, en parlant des nanoscientifiques dont il disent qu'après avoir roulé un nanotube de carbone et l'avoir déployé dans un circuit, ils ne s'inquiétaient pas d'être induits en erreur en croyant en l'existence de leur nanotube ou en se persuadant à tort que leur image était conforme à la nature. En effet, selon ces auteurs, les nanoscientifiques construisant leurs galeries d'images ne s'inquiétaient pas de ce que leur vision puisse être brouillée par leurs présupposés théoriques. Ils renchérissement en soutenant qu'« ils ne s'embarrassaient même pas de prouver indirectement l'existence des nanotubes en les utilisant à d'autres fins. » (Daston et Galison, 2012, p. 452-453). Il semble que la seule chose qui les intéressait était d'obtenir des « images-outils ».

Poursuivant son argumentaire, Hacking donne l'exemple du technicien Leeuwenhoek réputé pour la qualité et la rigueur de ses observations au microscope ainsi que la précision de ses dessins. Il pense pouvoir affirmer à son propos qu'il

devait son succès plus à un secret d'éclairage qu'à un secret de fabrication des lentilles qu'il remplaçait à chaque nouveau spécimen. Les prouesses de Leeuwenhoek sont telles que l'on peut distinguer clairement certains progrès technologiques du microscope des progrès théoriques de l'optique. Hacking dira que c'est peut-être dans l'invention de la lumière noire que reposait le génie et le succès de Leeuwenhoek, plutôt que dans ses microscopes. Cependant, afin de réussir ses observations, il a eu besoin de microtomes pour découper plus délicatement les spécimens, de colorants azoïques, de sources de lumière pure et, accessoirement, de micromètres, de fixatifs et de centrifuges (Hacking, 1989, p. 313).

Toujours dans ce registre de l'observation au microscope, Hacking note que certains développements des meilleurs microscopes anglais au début du XX<sup>e</sup> siècle étaient le fruit d'un « pur empirisme » combiné à des idées volées à Abbe dont les travaux permirent enfin en 1873 d'expliquer le fonctionnement du microscope. En effet, en s'intéressant au problème de la nette distinction des lignes parallèles de petites créatures océaniques dont raffolent les baleines appelées diatomée, Abbe réalisa la proximité de ces lignes ainsi que leur égale largeur et leur quasi-équidistance. Ses travaux lui permirent de disposer très vite de réseaux artificiels plus réguliers. De la seule observation d'une diatomée ou d'un réseau, remarque Hacking, il inféra que l'infinie complexité de la physique était en jeu lorsque l'on observait un objet hétérogène au microscope, ce qui fait de l'analyse de Abbe un exemple éloquent de la façon dont la science pure pourrait être appliquée (Hacking, 1989, p. 317). Ce cas ne serait pas unique puisque les bateaux à voile, bien que produits depuis des siècles, voire des millénaires, n'ont pu être optimisés que récemment, c'est-à-dire dans les deux dernières décennies précédant le début du XX<sup>e</sup> siècle. Hacking complète son propos sur Abbe en soutenant que :

Cependant, les seules rivalités nationales ou commerciales ne suffisent pas à expliquer que certains aient hésité à croire Abbe. J'ai dit ci-dessus que la citation (A) est extraite du livre de Gage, *The Microscope*. Dans la 9<sup>e</sup> édition de ce manuel (1901), l'auteur fait référence à la théorie alternative qui soutient que la vision microscopique est identique à celle de « l'œil sans assistance, du télescope et de l'appareil photo ». Il



ajoute : « C'est une conception originale que beaucoup préfèrent aujourd'hui. » Dans la 11<sup>e</sup> édition (1916) ce passage est modifié : « On a conçu certaines expériences très frappantes pour prouver la véracité de la thèse de Abbe, mais comme beaucoup le font remarquer, ces expériences demandent que soient mis en œuvre des moyens que la microscopie ordinaire ne requiert jamais. » C'est là un bon exemple de ce que Lakatos appelle un programme de recherche en dégénérescence. Pour l'essentiel, ce passage ne sera pas modifié, même dans la 17<sup>e</sup> édition (1941). Il fallait que les réticences à l'égard de la doctrine de Abbe soient bien ancrées pour que l'on soutienne, comme dans la citation (A), qu'« il n'y a et ne peut y avoir de comparaison entre les visions microscopique et macroscopique ». (Hacking, 1989, p. 318-319).

Dans cette pléthore de microscopes dont Hacking tente de retenir quelques-uns et qui n'est pas sans rappeler la prolifération actuelle des nanoscopes qui a suivi l'invention du microscope à effet tunnel, il semble miser sur les microscopes à rayon X et acoustique dont il vante l'immense potentiel alors qu'au moment où il publiait son ouvrage, le microscope de Binnig et Rohrer existait depuis deux ans déjà. Mais, ce qu'il nous dit de ces instruments n'en est pas moins pertinent pour notre présent propos puisque de son analyse il ressort que « la théorie ne joue qu'un rôle modeste dans la conception de ces ingénieux appareils. » (Hacking, 1989, p. 323). Ce qui lui fait tirer la conséquence selon laquelle, en dernière analyse c'est la technique qui compte. Toutefois, il ne nie pas pour autant l'importance de la théorie qui interviendrait ailleurs. Il dit à ce propos :

On peut considérer que la théorie intervient à un autre niveau. Pourquoi croit-on aux images que l'on construit avec un microscope ? Ne serait-ce pas parce que nous disposons d'une théorie selon laquelle l'image que nous produisons est vraie ? N'aurions-nous pas là encore une autre illustration de la thèse de Shapere, à savoir que ce que l'on appelle « observation » est en fait déterminé par la théorie ? Ce n'est qu'en partie exact. Malgré Bichat, ceux qui avant Abbe regardaient dans le microscope croyaient en l'existence de la plupart des choses qu'ils y voyaient, même s'ils ne disposaient pour soutenir cette croyance que d'une théorie très inadéquate et assez rudimentaire (et qui de plus s'avéra fausse). Il est surprenant de constater à quel point les représentations visuelles supportent bien les changements de théorie. On produit une représentation puis on formule une théorie qui explique pourquoi le spécimen présente telle ou telle configuration. Par la suite, la théorie sur le microscope peut bien changer complètement, on croit encore à la représentation. Nos certitudes sur la réalité des choses que l'on voit peuvent-elles vraiment se fonder sur la théorie ? (Hacking, 1989, p. 323).

La réponse de Hacking à cette question rhétorique est évidemment « non » puisque selon lui, la microscopie a plutôt recours à la « non-théorie », comme l'étaye l'échange de correspondance qu'il a eu avec Heinz Post qu'il relate dans l'ouvrage



que nous venons de citer. Il rapporte ainsi que ce dernier l'informa de ses propres thèses sur le microscope à émission de champ afin de soutenir l'idée que la production de représentations visuelles de grosses molécules était d'importance capitale. Sauf que, selon le philosophe de l'intervention, son dispositif était censé confirmer l'idée de F. A. Kekule selon laquelle les molécules de benzène sont des anneaux composés de six atomes de carbone. En fait, la théorie sur le microscope à émission de champ laissait croire que l'on ne voyait essentiellement que les ombres des molécules, autrement dit, que l'on était en présence d'un phénomène d'absorption. Selon Hacking, Post n'apprit que beaucoup plus tard que cette théorie avait été discréditée et qu'en fait, ce qui était observé, c'était les phénomènes de diffraction. Cette réalité révélée n'empêcha pas que l'on continuât à considérer les micrographies de molécules comme des représentations authentiques. De cette analyse, il ressort qu'en tant qu'activité expérimentale, la microscopie (et nous présumons que la nanoscopie aussi, bien qu'elle soit plus qu'une simple activité expérimentale) utilise ce que Hacking appelle la « non-théorie » afin de distinguer l'artefact de la chose réelle, selon un procédé qu'il résume ici dans son argument dit de la grille en répondant en même temps à un argument de l'antiréaliste van Fraassen :

En bref, plutôt que de nous rendre sur Jupiter à bord d'un vaisseau spatial imaginaire, nous réduisons couramment des grilles. Puis nous regardons le disque minuscule, avec pratiquement n'importe quel type de microscope, et nous voyons exactement les mêmes formes et lettres que celles qui ont été dessinées à l'origine à plus grande échelle. Il est impossible de soutenir sérieusement que ce disque minuscule que je tiens avec des pincettes n'a pas réellement la structure d'une grille portant des lettres. Je sais que ce que je vois au microscope est véridique parce que c'est bien ainsi que la grille a été conçue. Je sais que le processus de fabrication est fiable parce que l'on peut en vérifier les résultats au microscope. Plus encore, cette vérification peut être effectuée avec n'importe quel type de microscope, un quelconque parmi une douzaine de systèmes physiques sans lien permettant de produire une image. Peut-on croire encore qu'il ne s'agit que d'une gigantesque coïncidence ? (...). Pour être antiréaliste à propos de la grille, il vous faudrait imaginer que quelque mauvais démon cartésien possède le microscope. (Hacking, 1989, p. 329-330).

Ainsi, plutôt que de feindre des hypothèses ou d'imaginer des *scenarii* fictionnels, les microscopistes se contentent de réduire le monde visible. Les grilles micrométriques qui servent à l'identification des corps denses en sont une

illustration, et ce d'autant plus que leurs procédés de fabrication sont à la fois bien connus et bien maîtrisés. De plus, le fait que l'on puisse vérifier les résultats du processus de fabrication au microscope est une garantie de sa fiabilité confortée par le fait que n'importe quel type de microscope parmi une demi-douzaine de systèmes physiques sans lien permettant de produire une image serait susceptible d'effectuer cette vérification. Cet argument sert, une fois de plus, le réalisme de Hacking qui estime qu'il faudrait s'imaginer une gigantesque conspiration de treize processus physiques distincts dans le but de réduire une grille en non-grille qui continue de ressembler à une grille lorsqu'on la regarde avec douze sortes de microscopes différents. Même si l'auteur de *Representing and Intervening* (1983) reconnaît que son argument n'est pas conclusif, il soutient tout de même que la situation n'est pas différente de celle de la vision ordinaire où l'on peut avoir de bonnes raisons de penser que l'on est en présence d'une flaque d'eau plutôt que d'un mirage quand les changements d'angle d'observation ne changent rien à ce que nous pensons avoir observé. Cependant, même dans ce cas, on n'est pas à l'abri de l'erreur sporadique comme c'est le cas aussi en microscopie. Cette analogie permet à Hacking de tirer une autre conséquence selon laquelle la similitude des erreurs commises tant en microscopie qu'en macroscopie militerait en faveur de l'idée selon laquelle on voit bien au microscope (Hacking, 1989, p. 331). Mais, il ne perd pas de vue le fait que tout comme dans la vision ordinaire, les images ou micrographies produites ne sont qu'un des éléments conduisant à la certitude. Aussi, son argument de la coïncidence n'est-il qu'un élément visuel, certes irrésistible, mais insuffisant à lui seul à fonder la conviction que l'on voit effectivement au microscope sans le concours d'autres modes de compréhension plus théoriques et une multitude de travaux expérimentaux. Hacking reconnaît ainsi, sans ambages, que « sans la pratique de la biochimie, la microscopie est en biologie aussi aveugle que les intuitions de Kant le seraient en l'absence de tout concept pour les formuler. » (Hacking, 1989, p. 332).

D'autre part, enthousiasmé par l'invention du microscope acoustique et son rapide développement, Hacking pense qu'un nouveau type de microscope est toujours intéressant parce qu'il peut révéler des aspects encore inconnus d'un spécimen. Il

est clair que Hacking n'avait pas en vue l'observation « haptique » (dont nous avons parlé au chapitre II), comme en témoigne sa focalisation sur la découverte de nouveaux aspects visuels, alors que le nanoscope qui vient d'être inventé permettait bien plus que cela, par-delà l'observabilité et la manipulabilité à l'échelle nanométrique. Il n'en demeure pas moins que sa vision de l'observation comme une pratique monolithique nous paraît intéressante pour les nanotechnosciences puisqu'elle permet de tenir compte des nouveaux moyens technologiques totalement inusités qui pourraient servir l'accessibilité visuelle des choses. Le sens qu'il donne au fait de regarder au microscope est aussi digne d'intérêt, dans l'optique qui est la nôtre, ici. Selon lui, regarder au microscope au travers d'un instrument est un acte immatériel. Regarder au travers d'une lentille fut la première étape technologique avant que l'on ne se mit à regarder au travers du tube du microscope composé. L'immatérialité de cet acte résiderait dans le fait que naguère, ce sont les photographies prises au microscope que nous étudions. Comme nous l'avons longuement vu dans nos premiers chapitres, cette vision a été révolutionnée par l'avènement des nanos. C'est ce qui fait que regarder au travers d'un microscope de la génération des STM ou des AFM n'est plus un acte aussi immatériel que celui décrit ici par Hacking. L'image a perdu son sens traditionnel et immatériel tout en gardant certaines de ses anciennes propriétés imageantes. Elle est devenue plus exactement ce que Daston et Galison (2012) ont qualifié d'« image-outils » rendant possible une autre quasi-aberration, la « vision tactile ». Ces auteurs pensent, en effet, qu'il y a deux catégories d'images : une virtuelle et une tactile. On voit bien ici que la catégorie d'image à laquelle fait référence Hacking est la première. Mais, pour les nanotechnosciences de ce début du XX<sup>e</sup> siècle, les images tactiles reflètent l'abolition de la distance entre ce qui est « observé » et ce qui est « vu », les auteurs de *Objectivité* parlent d'enchevêtrement entre voir et fabriquer. Ceci, à leurs yeux, rompt avec le mode de fabrication d'images plus familier qui a marqué beaucoup de générations de scientifiques qui s'en tenaient à une séquence en deux étapes. La première, rapportent-ils, consistait à pulvériser un proton contre un antiproton dans un accélérateur avant d'analyser le résultat de la collision à l'aide d'une chambre à bulles ou d'une image numérique ; alors que la seconde, dans un domaine de la

science différent, se contentait de préparer d'abord un échantillon de tissu pour produire ensuite une image du microscope électronique. En revanche, remarquent-ils, « pour les nanotechnoscientifiques du début du XXI<sup>e</sup> siècle, de telles représentations formées après coup devenaient le plus souvent inadaptées. » (Daston et Galison, 2012, p. 446).

Il faut dire que les nanographistes ont souvent besoin d'images pour la conception d'objets qui furent des « images-outils » entièrement intégrées au processus de fabrication, prenant ainsi leur distance d'avec les « images-preuves » rassemblées à l'appui de futures démonstrations. Les images-outils sont d'emblée manipulées.

### 5.3. Conclusion

Au terme de cette analyse de la philosophie de Hacking, nous retenons avec Gilbert Hottois, qu'il montre que l'information de la vision par la théorie tantôt aide tantôt empêche l'observation de ce qui est intéressant et significatif. Mais, nous dit Hottois ce qui l'interpelle et nous interpelle dans ce contexte d'une science devenue davantage intervention que représentation, c'est le développement des instruments d'observation, autrement dit, l'approche du réel comme « chargée de technique » (*technology loaded*) et pas simplement « chargée de théorie » (*theory loaded*). Le résumé que fait Hottois de ce que nous venons de dire sur la philosophie de Hacking nous semble assez éloquent pour que nous lui permettions de le dire ici avec ses propres mots :

Ainsi observe-t-on l'intérieur du soleil en utilisant les neutrinos émis par les processus solaires de fusion. On observe aussi *via* des microscopes utilisant des longueurs d'onde que nous ne pouvons pas percevoir (rayon X, ultraviolet, électrons...) de sorte que l'image de l'objet doit être construite, à partir d'interactions mesurées, comme une cartographie. La fiabilité quant à la réalité de ce que l'on observe augmente dans la mesure où des techniques différentes conduisent à des observations convergentes. Cette convergence réduit le risque que l'objet observé ne soit un artefact engendré par l'appareillage utilisé ou quelque interférence non connue. On a envie de dire que plus



x résiste aux interactions ou actions observationnelles que les expérimentateurs lui imposent, plus x acquiert de réalité et d'identité. (Hottos 2004a, p. 82).

Au-delà de la question de l'observation, la théorie interventionniste défendue par Hacking constitue une avancée notable vers la construction d'une philosophie appropriée à la spécificité des nanotechnosciences (revoir notre chapitre II) qui à bien des égards bouleversent nos présupposés habituels sur la science. Le fait est que ceux-ci sont peut-être biaisés depuis bien longtemps si l'on en croit Hacking qui soutient qu'il y a au moins autant de modes de représentation que de types de spéculation. Cependant, deux approches principales ont pu mener à des découvertes remarquables. Il s'agit, d'un côté de l'existence des modèles physiques illustrés par l'explication de l'effet Faraday par Kelvin<sup>84</sup>, et de l'autre des structures mathématiques. En parlant de la science du XIX<sup>e</sup>, le philosophe de l'intervention estime que l'on a souvent opposé à tort les physiciens allemands aux physiciens anglais, prétendant que les premiers favorisaient l'approche mathématique là où les seconds faisaient la part belle aux modèles physiques. Mais, prévient Hacking, cette idée est totalement fallacieuse puisque dans les faits les deux voies sont étroitement imbriquées et les découvertes des chercheurs impliqués dans l'une ou l'autre approche ne permettent aucunement de privilégier l'une sur l'autre puisqu'ils en arrivent sensiblement aux mêmes résultats. Mieux encore, il se trouve que la plupart

---

<sup>84</sup> Selon Hacking : « Faraday n'avait pas la théorie de sa découverte. L'année suivante, en 1846, G.B. Airy (1801-1892) montra comment lui donner une représentation analytique dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière. Les équations concernant la lumière contenaient quelques dérivées secondes du déplacement par rapport au temps. Airy ajouta quelques termes *ad hoc*, des dérivées du premier ou du troisième ordre. C'est un procédé normal en physique. Pour que les équations aient meilleure prise sur le phénomène, on ajoute quelques termes nouveaux et assez courants, sans d'ailleurs savoir pourquoi l'un ou l'autre convient mieux. »

En 1865, Kelvin proposa un modèle physique : Le champ magnétique fait tourner les molécules du bloc de verre sur des axes parallèles aux lignes de force. Ces rotations moléculaires s'associent aux vibrations induites par les ondes de lumière et provoquent ainsi la rotation du plan de polarisation. Le modèle de Kelvin fut adapté par Maxwell dans le cadre de sa théorie électromagnétique de la lumière. Cependant, il ne s'harmonisait pas bien avec les détails expérimentaux rapportés par Verdet. Aussi Maxwell eut-il recours à l'argument de symétrie pour déterminer les termes additionnels dans le cadre des équations différentielles déjà utilisées pour décrire le champ électromagnétique. Finalement, en 1892, H.A. Lorentz associa les équations de Maxwell à sa théorie de l'électron. Ce qui donna l'explication encore en vigueur aujourd'hui. L'effet est expliqué physiquement - à la manière de Kelvin - comme un mouvement local autour des lignes de force. Cependant, il ne s'agit pas d'une mystérieuse rotation moléculaire kelvinienne, mais plutôt d'un mouvement d'électrons induit électromagnétiquement. » (Hacking, 1989, p. 341-342).

des modèles physiques, dont celui de Maxwell, ont recours à des structures abstraites, ce qui fait que sa mécanique statistique ne se composait pas de particules concrètes, mais d'équations différentielles dépourvues de signification physique immédiate. En Allemagne, en revanche, poursuit Hacking, les mathématiques appliquées reposaient surtout sur la description de modèles physiques. Ces deux approches reflètent fondamentalement les diverses facettes de l'esprit humain qui ne sont pas séparables, en général, et qui continueront à s'influencer et à se transformer suivant des processus imprévisibles (Hacking, 1989, p. 343-344).

Par ailleurs, il doit être rappelé que l'expérimentateur n'est ni nécessairement ni toujours assujéti à une quelconque théorie qu'il attendrait comme une condition *sine qua non* de ses activités ; et, l'expérience non plus n'est pas une théorie par d'autres moyens. Pourtant, c'est bien ce que soutient Bas van Fraassen (1980, p. 73) lorsqu'il affirme dans *The Scientific Image* que pour le scientifique pratiquant, ce qui importe vraiment dans la théorie, c'est qu'elle soit un moyen dans la conception des expériences. Puis complétant son propos, il évoque les travaux de Millikan dont il dit que « l'expérimentation, c'est la continuation de la théorie par d'autres moyens ». De l'analyse que Hacking fait de ces thèses de van Fraassen, il ressort que celles-ci pourraient sembler contradictoires, ou alors leur auteur s'imagine que l'expérience se remarquerait elle-même faisant de la théorie par d'autres moyens pour que l'on puisse faire plus d'expériences. Ce qui, de l'avis de Hacking, « ne serait pas une mauvaise image en ce qui concerne Michelson, car, avec la valeur de  $e$ , des expériences assez différentes devinrent possibles. » (Hacking, 1989, p. 383). Il pense que ce qu'il appelle l'aphorisme de la « théorie par d'autres moyens » est fondé sur l'idée selon laquelle la théorie suggère que l'électron existe et que les électrons ont une charge définie. Mais, étant donné qu'aucune réflexion théorique n'est parvenue à fixer la valeur de  $e$ , nous faisons avancer la théorie par d'autres moyens en déterminant expérimentalement  $e$ . Il y a donc une lacune dans la théorie obligée de faire place à l'expérimentation, si elle ne lui était pas concomitante. Ainsi Hacking juge la métaphore de l'antiréaliste plaisante sans se résoudre pour autant à lui accorder quelque crédit. Car Cavendish a découvert la valeur de la constante

gravitationnelle  $G$  sans pour autant avoir prolongé d'aucune façon la théorie de Newton. En effet, dit Hacking, non seulement la valeur de cette constante ne fait pas seulement partie de la théorie, mais en découvrant celle-ci, Cavendish n'a pas fait avancer la théorie,  $G$  étant une constante physique unique. Ce qui, nous rappelle-t-on, est assez inhabituel puisque la plupart des constantes physiques sont reliées par des lois à d'autres constantes.

À l'instar du philosophe canadien, nous ne pouvons qu'espérer que des liens existent et il ne faut pas désespérer de les découvrir un jour tout comme nous espérons que la force gravitationnelle, la force électromagnétique, les forces faible et forte soient réunies prochainement dans une même théorie. Beaucoup de physiciens y travaillent actuellement. Ou bien, suggère Hacking, pourrions-nous reprendre cette idée émise par Dirac nous invitant à supposer que l'univers ait  $10^{11}$  années et qu'il devenait plausible que la force gravitationnelle, comparée à la force électromagnétique, diminue annuellement d'environ  $10^{-11}$  parties, un prorata que l'on pensait pouvoir mesurer assez rapidement au début des années 1980 grâce aux progrès de la technologie de l'époque. Si une telle chose se produisait, Hacking concède qu'elle nous apprendrait beaucoup sur le monde, mais nul ne pourrait soutenir qu'elle prolongerait la théorie newtonienne ou n'importe quelle autre, par d'autres moyens. Ainsi, bien que partageant la répugnance de van Fraassen pour ce modèle de la science où les expérimentateurs attendent passivement qu'on leur dise de vérifier, de confirmer ou de réfuter les théories, sans nier le fait qu'il arrive souvent aussi, même si ce n'est pas leur préoccupation première, qu'ils en confirment, pour lui, il semble bien que le rapport de Millikan à la théorie tient à ce qu'il a confirmé tout un ensemble de spéculations en découvrant qu'il existe une charge électrique négative minimum, vraisemblablement associée à l'électron, tenu pour une entité hypothétique. Il a aussi découvert la valeur de cette charge minimum, « mais ce nombre n'a pas grand-chose à voir avec la théorie. » (Hacking, 1989, p. 385). Son apport fut donc d'avoir contribué à établir d'autres constantes avec plus de précision, sans pour autant que celles-ci n'aient influencées le cours de la théorie (Hacking, 1989, p. 383-385).



Comme le dit si bien Hottois, « en suivant Hacking, nous sommes arrivés à une philosophie des sciences qui tient compte d'une façon non marginale de la technique, à la fois comme médiatrice et créatrice. » Et, au fond, c'est bien cela que nous recherchions depuis le début de la présentation des résultats de nos investigations. Mais, le philosophe belge complète son propos en précisant que cette philosophie, malheureusement, s'arrête au seuil des questions nouvelles d'ordres politiques, éthiques et pratiques qui surgissent alors. Selon lui, c'est ainsi que Hacking se recroqueville sur son identité de philosophe des sciences anglo-saxon et sur les questions épistémologiques et ontologiques du réalisme (Hottois, 2004a, p. 117). Si nous prenons au mot ces remarques de Gilbert Hottois, nous devons prévenir que nous non plus n'allons pas beaucoup plus loin que le philosophe de l'intervention, mais nous espérons toutefois offrir des pistes sérieuses pour le développement d'une réflexion philosophique féconde autour des nanotechnosciences. Toutefois, toujours selon Hottois, « au-delà de l'impression d'une certaine cacophonie, la reconnaissance de la technoscience comme enchevêtrement n'est sans pertinence, en soi et en tant qu'invitation à analyser la complexité. » (Hottois, 1989, p. 161). Cependant, précise-t-il, cet enchevêtrement ne devrait pas signifier que l'on ferait de la science comme on fait de la littérature ou de la politique, mais réfère simplement à l'existence d'interactions fortes, multiples et incessantes entre le symbolique et le technoscientifique. À son avis, cette réalité est banale, mais elle est encore insuffisamment intégrée dans la conscience et dans la philosophie contemporaine (Hottois 2004a, p. 161). Par contre, à la suite de Simondon, Hottois dénonce la réduction de la philosophie de la technique à la philosophie sociale et politique, sachant que pour lui, sous la « technique », il convient d'entendre ce que l'on a appelé couramment au XX<sup>e</sup> siècle « la recherche scientifique » (Hottois, 1989, p. 171). Ce rappel, dit-il, est explicite dans l'expression « technoscience » qui souligne que cette recherche est, en même temps, « entre les mains d'*homo faber* autant que dans le discours et le regard d'*homo loquax*. » (Hottois, 2004a, p. 171).



Revenant sur l'importance acquise par la technologie dans l'activité scientifique, le philosophe européen donne la parole à Lenk et Maring qui la comparent à l'instrument tout en nous permettant d'avoir une meilleure idée de sa place dans la science ainsi que sa portée philosophique. Aussi, affirment-ils :

La technologie n'est plus simplement l'instrument de la recherche scientifique, mais la médiation épistémologique constitutive. Un instrument est contingent, extérieur, abandonné lorsque le but est atteint. La médiation est permanente, déterminante pour l'activité, et elle laisse sa marque dans les résultats obtenus. Elle affecte la visée théorique même qui était la caractéristique de la science. Elle modifie radicalement les notions d'objet et de réalité scientifiques ; elle transforme la question du réalisme qui devient « un réalisme technologique ». Celui-ci soulève le problème de la « quantité de technologie » « susceptible d'être supportée par l'objet sans être transformée en un objet scientifique différent ». (Lenk et Maring, 2001, p. 24, cités par Hottois, 2004a, p. 111).

C'est sur ce rôle déterminant de la technologie que nous nous sommes focalisés dans notre analyse en tenant compte de leur omniprésence dans le nanomonde, ce qui leur confère un statut bien loin de celui d'accessoire auquel on était habitué à la voir confinée. C'est cet état de fait qui justifie en grande partie notre préférence pour des termes comme « technoscience » à l'instar d'Hottois (2004a), et « nanotechnosciences », à l'image de Nordmann (2004). Ces deux concepts intégrateurs rendent mieux compte à la fois de l'internalisation de la technique dans la science et de l'internalisation de la science dans la technique. Parlant de l'idée qu'il se fait de la technoscience, le philosophe belge pense que cet équilibre sert aussi à prévenir d'autres abus, mais à condition de se rappeler d'abord que la science désigne aussi une entreprise de recherche illimitée, libre et infinie, puis que la technique est le plus souvent réduite à un ensemble d'outils disponibles au service de finalités qui lui seraient étrangères et sur lesquelles elle n'agirait pas. « Le risque, selon lui, est celui d'une gestion technocratique douce de l'espèce humaine – dans laquelle l'économie joue un rôle capital – satisfaisant ses besoins biologiques aussi efficacement que ses désirs symbolisés. » (Hottois, 2004a, p. 171).

Se prononçant sur la philosophie de Hacking, Hottois convient que même s'il faut respecter la position de Hacking qui se refuse à sortir du débat à la fois vaste et

limité sur le réalisme en philosophie des sciences, il lui paraît difficile de demeurer simplement au sein de la classique philosophie des sciences, comme si tout ce que Hacking faisait se résumait à renouveler la question du réalisme. C'est pourquoi, selon lui, la pensée de Hacking pointe ailleurs, hors de la problématique épistémologique et ontologique à laquelle la philosophie des sciences s'est tenue jusqu'ici. Du point de vue de celle-ci, il n'y plus grand-chose à dire puisque « *construire* » la réalité serait un processus illimité de création et de *facto* n'aurait plus grand-chose à voir avec « *représenter* » la réalité. Ce qui fait dire au philosophe belge que représentations et réalités sont intégralement instrumentalisées dans le processus. Ainsi ne serions-nous plus dans le prolongement d'une quelconque ontologie, mais dans une technologie qui clôt les débats ontologiques (Hottois, 2004a, p. 86). D'un autre côté, Hottois précise qu'entre sa deuxième leçon de *Philosophie des sciences, philosophie des techniques* où il conclut son analyse de la philosophie des sciences conduite par Hacking jusqu'au seuil de la philosophie des techniques sans oser affronter la recherche et développement technoscientifique ainsi que les problèmes de philosophie pratique suscités par sa philosophie de l'intervention qui abandonne du même coup le classique primat de la raison sur la volonté dans la réflexion philosophique sur les sciences et les techniques et sa troisième leçon sur la philosophie des techniques qu'il conclut en dénonçant l'assimilation précipitée de ces philosophies à la philosophie pratique, éthique, sociale et politique, il n'y a point de contradiction. En fait, nous dit-il, il reproche à la philosophie des techniques de perdre de vue ou d'affaiblir la prise en compte de l'opérativité objective et de la créativité inanticipable des techniques, et de craindre leurs rétroactions destructrices-créatrices sur les ordres symboliques. Il manifeste ainsi sa crainte de la voir subordonner les techniques à des ordres symboliques (éthique et politique), c'est-à-dire traditionnels. Selon Hottois, en effet :

Ces ordres renvoient toujours au présupposé commun des religions et des philosophies : la définition essentielle de l'homme comme l'animal symbolisant. C'est elle qui entraîne l'externalisation de la technique à la fois du propre humain et de la pureté scientifique. C'est elle qui interdit la considération sérieuse de l'anthropotechnique pourtant inévitable si l'on suit jusqu'au bout la naturalisation de l'homme et la technicisation de la science. Je reproche à la philosophie sociale et politique appelée par la plupart des philosophes des techniques d'entretenir une vue

étroite et courte, traditionnelle et conservatrice, de l'homme et de l'avenir de l'espèce humaine. (Hottois, 2004a, p. 171).

Cela étant, afin de ne pas trop nous éloigner de notre propos, il nous semble qu'un autre philosophe plus ancré dans l'univers technicien cette fois-ci semble bien préparer le terrain sur l'analogie que nous voulons établir à des fins heuristiques avec les « actes de discours » d'Austin. Il s'agit de Don Ihde (1991), dont Hottois dit qu'il fait un usage abondant de la métaphore du corps et de l'incorporation ou incarnation. La science serait alors incarnée dans la technique et l'instrumentation. Comme Austin le fait au niveau du discours ordinaire, la conception d'Ihde, selon l'analyse de Hottois, permet d'articuler philosophie des sciences et philosophie des techniques qui se rejoignent sur le plan de l'interface essentielle, nécessaire, de la technologie. Cette métaphore du corps lui fait jouer un rôle d'interface qui inviterait à penser la science et la technique au même niveau que le corps vivant. Ainsi réapparaissent les thématiques d'organes-instruments, de prolongement, remplacement, accroissement, voire amélioration d'organes dont il est de plus en plus question dans le transhumanisme et le posthumanisme qui ont fait écho aux nanotechnosciences dès ses premiers balbutiements. Dans l'approche de Ihde, la science incorporée dans la technique ou se donnant un corps par la technique se veut homogène au corps biologique, ce qui facilite le rapprochement entre description instrumentale et perception (Hottois, 2004a, p. 115). Se rapprochant de Hacking auquel il se réfère beaucoup sur la question du microscope notamment, le réalisme de Ihde, différent de celui de l'interventionniste, est instrumental. Car, l'accès au réel nécessite des médiations techniques et théoriques, et que l'expérience, qui permet en bout de ligne d'obtenir des données actives et opératoires, est à la fois élargie et augmentée. Cependant, commente Hottois, « il reste que c'est la réalité *donnée* à la perception instrumentale qui est visée, non la transformation de la réalité et moins encore sa production. » (Hottois, 2004a, p. 115). Selon le rapport que le philosophe européen fait de *Instrumental Realism: The Interface Between Philosophy of Science and Philosophy of Technology*, c'est précisément cela qui démarque ce réalisme de celui de Hacking qui est plutôt un

réalisme d'intervention, de manipulation, quasiment de ce qui se construit comme réel (Hottois, 2004a, p. 115).

D'autre part, se définissant comme appartenant au courant philosophique des « euro-américains » qu'il distingue de celui des philosophes analytiques et linguistiques « anglo-américains », Ihde se lance à l'assaut de la philosophie des sciences anglo-saxonne par le truchement des courants phénoménologiques qui mettent l'accent sur le caractère incarné de toute perception ou expérience. Ce faisant, il rejette toute idée d'originalité ou de nature plus authentique qu'une autre, récusant dans le même élan le privilège phénoménologique dont on pourrait créditer toute expérience fondamentale. Selon Hottois, Ihde associe ce désir de fondation à la tendance technophobe ou techno-indifférente de la phénoménologie tout en dénonçant sa conception logothéorique de la science. Et, Hottois d'ajouter non sans ironie que « le maximum de matérialité ou de corporéité que cette conception reconnaît est le langage, la représentation symbolique. » (Hottois, 2004a, p. 114). En vérité, estime-t-il, technophobie et fondationnalisme sont solidaires si l'on admet que la technique est à l'œuvre dans la *praxis* et la perception constitutive de la science de façon positive et originelle. À partir de ce moment, les raisons de privilégier un discours et une expérience originaires et fondateurs se dissipent. Du coup, d'autres phénoménologies d'expériences diversement et plus ou moins technologiquement médiatisées ne seront pas davantage justifiées. Un privilège technologique tel qu'une expérience naturelle médiatisée par le corps et ses sens ou une technique artisanale particulière ne pourrait exister, à moins d'imaginer une science sans corps ni perception.

Pour en finir avec cette recension de l'ouvrage de Ihde qui offre des pistes de réflexion intéressantes aux futures philosophies des nanotechnosciences, l'analyse qu'il fait de la pensée d'Heidegger sur la technologie est tout aussi importante. Il retient ainsi en Heidegger le philosophe qui a saisi très tôt la priorité ontologique de la technologie sur la théorie et sur la science en tant que théorie. Cependant, il émet de fortes réserves lorsque le philosophe allemand fait dériver la technologie



contemporaine de la science moderne tout en la dévalorisant à l'avantage des techniques anciennes qu'il idéalise à l'excès. Pour Ihde, *a contrario*, c'est la technique qui est ontologiquement et historiquement déterminante de la science moderne et contemporaine, la distinguant ainsi de la science ancienne. En outre, selon lui, la science contemporaine est « technologiquement *incorporée* (ou *incarnée* dans sa nécessaire instrumentation et aussi *institutionnellement insérée* dans les structures sociales d'une société technologique » (Ihde, 1991, p. 63, cité par Hottois, 2004a, p. 114). Malgré le caractère séduisant et peut-être heuristique de ces thèses que nous venons de présenter brièvement ici, il convient de reconnaître qu'en ce qui concerne les nanotechnosciences, les problématiques et les enjeux excèdent ceux qui sont pris en compte et traités tant par Ian Hacking (1983/1989) que Don Ihde (1991). C'est ce que permet de saisir le commentaire de Sacha Loeve (2009) dans son analyse des discours accompagnant le STM dont il retient deux aspects. Le premier est que l'image est porteuse d'un rapport de proximité et d'intimité avec la molécule, non sans un paradoxe que ne manque pas de souligner le chercheur, celui qu'il qualifie de « théorie sans distance où la simulation tend à confondre objet et modèle, théorie et expérience dans l'immédiateté d'une image pourtant fabriquée médiatement. » (Loeve, 2009, p. 453). Deuxièmement, l'image, bien que consubstantielle à un objet spécifique, en un sens, est détachable, mobile, transverse, à la fois publique et privée, « mondialisable », elle se comporte comme si elle avait une sorte de don d'ubiquité. Selon Loeve, une même image peut circuler d'un laboratoire à un autre, voire d'une discipline à une autre. C'est ainsi qu'en restant à Toulouse l'on peut parfaitement voir la même molécule qui, pour ainsi dire, voyage de la Ville Rose à Berlin grâce à l'abolition de la distance entre représenté et représentation (Loeve, 2009, p. 453). Ce qui veut dire en clair, dans l'optique de nos propos dans ce chapitre V, qu'il ne s'agit pas de se contenter, comme Hacking le fait très bien, de passer d'une philosophie de la représentation à une philosophie de l'action, mais bien d'aller au-delà de ce clivage qui perd beaucoup de son sens dès qu'il est question de nanotechnosciences. Cet état de fait est bien compris par Alfred Nordmann (2004) lorsqu'il apporte la précision capitale

suivante qui s'inscrit en droite ligne dans le sens de l'une des thèses que nous avons défendues tout au long de ce travail :

Rigoureusement parlant, la recherche nanométrique concerne l'architecture moléculaire, la nanotechnologie vise le contrôle de cette architecture, tandis que la nanoscience étudie les propriétés physiques qui en dépendent. Toutefois, si cette thèse est correcte, il s'avère que même les nanosciences ne sont pas la « science » rigoureusement ou traditionnellement parlant, et que même pour les nanosciences il n'y a pas de distinction entre la représentation théorique et l'intervention technique, entre la compréhension de la nature et sa transformation. Plus adéquatement on devrait donc parler de NanoTechnoScience<sup>85</sup>. (Nordmann, 2004, p. 51, notre traduction).

C'est alors que la recommandation de Denis Vernant prend tout son sens vers les pistes heuristiques que nous allons tenter de baliser plutôt brièvement dans le cadre de notre conclusion générale, tout en nous promettant de les développer plus amplement selon les opportunités de recherches futures qui, nous l'espérons, s'offriront à nous. En effet, selon Vernant, si nous abandonnons le représentationnalisme et le réalisme naïf, l'alternative qu'il nous offre serait « de thématiser la vérité dans les termes d'une *véridicité* qui soumet nos croyances à l'épreuve de l'expression langagière comme de la discussion contradictoire et lui impose la sanction de nos pratiques effectives, qu'elles soient prosaïques, scientifiques, artistiques ou encore politiques. » (Vernant, 2009, p. 231). Ce n'est pas tout à fait ce que fait Austin à qui le philosophe français reproche le caractère monologique de son approche à laquelle il préfère substituer une démarche dialogique, mais nous assumons nos intuitions de départ que nous rectifierons au besoin grâce à la contribution du praxéologue grenoblois qui devrait nous permettre de jeter les bases d'une philosophie de la nanotechnoscience que nous qualifierons de « transactionniste ».

---

<sup>85</sup> Voici l'extrait du texte que nous avons traduit ci-dessus : « Roughly speaking, *nanoscale research* concerns molecular architecture, *nanotechnology* aims for the control of this architecture, and *nanoscience* investigates the physical properties that depend on it. However, if the thesis is correct, it turns out that even nanoscience isn't "science" properly or traditionally speaking, and that even for nanoscience there is no distinction between theoretical representation and technical intervention, between understanding nature and transforming it. More properly one should therefore speak of NanoTechnoScience. [Alfred Nordmann, « Molecular Disjunctions: Staking Claims at the Nanoscale », in D. Baird, A. Nordmann & J. Schummer (2004), *Discovering the Nanoscale*, IOS Press, Amsterdam, p. 51].

## CONCLUSION

En définitive, la thèse que nous soutenons ici est que les nanotechnosciences relèvent de quelque impensé de la philosophie des sciences que nous avons étudiée à travers quelques-unes de ses grandes figures, en l'occurrence Kuhn, Hacking, Lakatos et Robert. Afin d'étayer cette thèse, nous avons cru bon de revenir sur l'étymologie du concept même de « nanotechnologie ». À cette occasion, nous avons aussi critiqué la tendance à vouloir faire de Feynman ou des vitriers du Moyen Âge les précurseurs des « nanotechnologies ». Puis, nous nous sommes engagés à donner une définition des « nanotechnologies » qui tienne compte de l'activité en tant que telle, de son histoire et de la signification du concept « technologie » que précède le préfixe « nano ». De cette mise au point conceptuelle, nous avons fait suivre une analyse des philosophies des sciences de Kuhn à Robert en passant par Lakatos qui révèle la focalisation de leurs systèmes sur la théorie, sous-traitant ainsi la dimension technologique intrinsèque à l'activité nanotechnoscientifique. Or, pour nous, une condition nécessaire à toute philosophie des nanos est de prendre en compte la dimension technologique *sui generis* à l'activité nanotechnoscientifique, même si elle demeure non suffisante. Nous avons donc établi que, même si la philosophie de Hacking était celle qui donnait la plus grande place à la dimension technologique de la science à travers l'appareillage et l'expérimentation, cela n'en fait pas pour autant une philosophie suffisamment élaborée pour la technoscience ou la nanotechnoscience, comme l'a bien vu Hottois (2004a). Il indique, à l'instar de Schmidt (2011), la voie vers Bacon. Bien entendu, la philosophie des nanos est actuellement en construction et de nombreux philosophes, à l'instar de Nordmann, Schummer, Schmidt, Mody et d'autres, tant en Amérique du nord qu'en Europe, s'y consacrent de plus en plus. Les pistes qu'ils proposent sont très intéressantes et indiquent essentiellement la voie vers Peirce (Nordmann, 2012) ou Bacon que Schmidt (2011) considère comme le père de la philosophie de la technoscience. Dans leur optique, on pourrait indiquer Bachelard

aussi. En ce qui nous concerne, il nous a paru important de mettre en lumière ce qui a vraiment changé avec l'avènement des nanotechnosciences tout en précisant les conditions sans lesquelles il serait illusoire d'envisager toute « nanophilosophie » sérieuse.

C'est pourquoi, dans le premier chapitre de notre travail, nous avons estimé nécessaire de revenir en détail sur le débat portant sur l'étymologie et l'histoire du préfixe *nano*. Ainsi, comme nous l'avons vu, contre une idée reçue très répandue sur l'origine grecque de ce morphème, nous établissons le fait que lorsque l'on parle des « nanotechnologies » ou des nanotechnosciences, ce à quoi l'on fait référence ne correspond pas, rigoureusement parlant, à l'origine grecque trop souvent évoquée par la plupart des textes que nous avons étudiés sur les nanos. En conséquence, nous avons établi que l'étymologie du préfixe *nano* est plutôt latine et que celle-ci exprime mieux le milliardième de mètre auquel elle se rapporte à chaque fois qu'il est question de nanotechnologie, de nanoscience ou de nanotechnoscience. Ensuite, toujours dans le chapitre I, nous critiquons l'idée selon laquelle le père des nanotechnologies serait Richard Feynman (1918-1988). Nous mettons en question la pertinence du recours à ce dernier à qui Eric Drexler a attribué trop rapidement le statut de précurseur qui a été repris par la plupart des auteurs après lui. Puis, nous avons souligné les conditions qui ont présidé à l'avènement de ce que l'on appelle communément les « nanotechnologies », notamment une invention technologique cruciale, celle du microscope à effet tunnel (1981) par les ingénieurs d'IBM Binnig et Rohrer ainsi que la première manipulation d'atomes effectuée en 1989 et portée à la connaissance du public en 1990 (Revue *Nature*, n° 344, p. 524-526) par Donald Eigler et Erhard K. Schweizer, ce qui ouvrent l'ère de la nano-exploration technoscientifique. Enfin, nous avons bouclé ce chapitre préliminaire avec quelques illustrations de nature à étayer notre propos.

Le deuxième chapitre a été l'occasion pour nous d'exposer deux méthodologies opposées basées sur des procédés totalement différents, même s'ils peuvent être complémentaires à certains égards. En effet, miniaturisation et monumentalisation



cristallisent toute l'opposition entre *top-down* et *bottom-up* tout en reproduisant certains termes du débat sur le caractère révolutionnaire ou non des nanos. Puis, nous nous sommes livrés à un examen critique des définitions les plus répandues, pas toujours compatibles entre elles, afin d'arriver à les classer convenablement pour mieux les appréhender. À cette revue des définitions, nous avons fait succéder une analyse des enjeux de nature à impacter les orientations définitionnelles. Ensuite, sur le chemin qui nous mène à la validation du concept de nanotechnoscience, nous avons examiné brièvement les implications éthiques et ontologiques des « nanotechnologies ». En dernière instance, nous nous sommes engagés dans la voie de la définition des « nanotechnologies » qui finit de nous convaincre que le terme « nanotechnoscience » est bien plus approprié que celui utilisé habituellement pour désigner les activités actuelles autour du nanomètre. C'est au terme de ce chapitre que nous avons proposé la définition des nanotechnosciences inspirée de Nordmann (2008), Cressler (2009) et Joachim (2010). Ces derniers, comprenant l'inanité de forger un nouveau concept pour rendre compte de ce dont la dénomination, non seulement existe, mais est satisfaisante, ont considéré qu'il fallait soit revoir le contenu à admettre sous le nom de « nanotechnologie », soit désigner autrement ce cadre innovant. En partant de leurs travaux, nous sommes arrivés à la conclusion selon laquelle il fallait emprunter au premier le néologisme « nanoTechnoscience » suivant en cela la volonté du second de désigner différemment ce nouveau cadre ; et, du troisième, nous avons retenu la volonté de trouver le contenu adéquat pour mieux décrire la partie des nanos qui nous intéresse. C'est ainsi que nous avons construit la définition de ce nous qualifions de « nanotechnoscience » à partir du deuxième chapitre. Celle-ci est, selon nous, essentiellement une activité à visée scientifique ou technologique dont le but est de connaître, expliquer, prédire des phénomènes ou fabriquer des objets plus ou moins complexes afin de créer des structures ou des dispositifs à l'échelle nanométrique par une manipulation contrôlée à l'échelle atomique ou moléculaire grâce à des dispositifs technologiques sophistiqués de la génération du microscope à effet tunnel (cf. sous-chapitre « 2.5.3. Effets d'échelle, changements de propriétés et nanotechnoscience »). En fait, les nanotechnosciences

comme tout discours scientifique mettent en jeu l'ensemble des actes de langage, en l'occurrence les assertifs, les directifs, les promissifs, etc., mais leur spécificité est de fonctionner aussi comme des performatifs ou des « déclarations » au sens de Searle, mais à l'envers : « dire des mots avec des choses », créer un savoir nouveau avec des manipulations. Autrement dit, pour paraphraser Austin, *How to Do Words with Things?*

Cela posé, nous avons effectué dans les chapitres 3 et 4 l'évaluation de la philosophie des sciences de Kuhn suivie de celle Lakatos et Robert à l'aune des nanotechnosciences, celles-ci pouvant être entendues au sens de Jean-François Lyotard (1982/1993, p. 14-15) lorsqu'il défend l'idée selon laquelle à notre époque la science et la technologie forment la technoscience. Selon l'analyse que font Karen Kastenhofer et Jan C. Schmidt (2011) du chapitre 4 de la première partie (« *Intellectuals* ») de *Political Writings* (Lyotard, 1982/1993) intitulé « New Technologies », Lyotard identifie dans les sociétés développées quatre domaines : le scientifique, le technique, l'économique et l'étatique, chacun de ces domaines étant étroitement imbriqués les uns aux autres et ne se distinguant que dans la mesure où chaque domaine est régi par une Idée [ou idéal] différente. Le scientifique, par exemple est régi, guidé par l'idée de la meilleure connaissance, le technique par les performances optimales (le meilleur ratio entrée/sortie (*input/output*)), l'économique dirigé par l'idée de la plus grande richesse, l'État gouverné par l'idée du meilleur vivre-ensemble, chacune de ces Idées étant un absolu vers lequel on doit tendre, selon Lyotard. L'Idée a, donc, une fonction de régulation pour les discours et les actions se produisant dans chacun des domaines précités (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 129). Ces auteurs notent aussi que le philosophe de la postmodernité poursuit son argumentaire en faisant remarquer que les phrases des agents et leurs actes demandent à être évalués selon le critère qui correspond à l'Idée régulatrice de leur domaine propre puisqu'à l'époque actuelle la science et la technologie se combinent pour former la technoscience contemporaine. Dans la technoscience, la technologie joue le rôle de fournisseur de preuve aux arguments scientifiques. Elle permet de dire d'un énoncé scientifique qui prétend

être vrai que « c'est bien le cas », le cas échéant. Il découle de ceci une transformation profonde de la nature de la connaissance. La vérité est ainsi soumise à des moyens de « falsification » des énoncés scientifiques de plus en plus sophistiqués. (Lyotard, 1993, p. 14, 15). « Les quatre idées », qu'il a ajoutées dans sa conclusion, « ne sont pas des descriptions de la réalité, mais des idées régulatrices (contenant une prescription) » (Lyotard, 1993, p 18). Le concept d'Idées régulatrices se réfère aux « Idées Régulatrices de la Raison » de Kant (1787/1989) comme le « Temps », l'« Espace » et la « causalité ». Elles sont conçues comme des entités liées à la cognition qui orientent la façon dont nous abordons le monde (naturel) sans en faire partie. (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 130).

Ainsi, compte tenu de la place qu'occupe la technologie dans l'activité technoscientifique, nous nous sommes appliqués à déterminer dans la doctrine de ces philosophes dont nous avons étudié les textes la place qu'ils accordent à la technologie afin de déterminer leur aptitude à intégrer les nanotechnosciences dans leur domaine de compétence habituel. C'est sur cette base que nous avons commencé notre analyse par l'examen de la philosophie des sciences de Thomas Kuhn à travers sa relation avec la technologie, la place qu'il lui assigne et le rôle qu'il lui donne. De cette étude, nous avons conclu à l'inadéquation de la philosophie des sciences de Kuhn aux technosciences en général et aux nanotechnosciences en particulier. Puis, nous avons soumis Lakatos et Robert au même test que Kuhn, ce qui nous a permis d'observer quelques avancées notables quant à la reconnaissance du rôle central de la technologie, mais cette dernière demeure toujours assujettie à la « noble » théorie qui mène la danse de la recherche scientifique. Ces conceptions que Hacking qualifie de représentationnalistes seront dépassées par l'interventionnisme de celui-ci. Notre analyse est confortée par l'étude de Kastenhofer et Schmidt (2011) qui considèrent que lorsque Hacking formulait son fameux traité sur « la représentation et l'intervention », il se référait à un-e idé-e(al) de science basé-e sur l'ambition de représenter le monde naturel par la formulation de concepts théoriques et de lois naturelles qu'il complète par un-e idé-e(al) qui met l'intervention au cœur des pratiques de recherche expérimentale. Selon ces deux

auteurs, dans le texte de Hacking, représenter et intervenir sont dépeints comme deux manières scientifiques d'aborder le monde naturel qui ont été imbriqués depuis l'émergence de la science moderne. Celui-ci souligne en outre que les scientifiques ont pris conscience du caractère hybride résultant de leurs actions pendant une longue période, tandis que les philosophes des sciences ont négligé l'aspect interventionniste de la science, en ne se concentrant que sur son caractère représentationnel. Son plaidoyer pour reconnaître les deux aspects de la relation entre la science et la réalité en discutant et en analysant la science moderne, son caractère représentationnaliste aussi bien qu'interventionniste est ainsi évocateur de l'accent mis sur l'hybridité de la science actuelle bien saisie par le terme « technoscience ». Le label « technoscience » se réfère explicitement à une attitude technologique/interventionniste, autant que scientifique/représentationnaliste ; l'« imbrication » des deux positions et ses conséquences scientifiques aussi bien que sociétales sont des thèmes centraux dans la littérature technoscientifique émergente. (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 126-127). Kastenhofer et Schmidt remarquent que :

Néanmoins, dans le traité de Hacking autant que dans la littérature technoscientifique, les deux positions ou idé-e(aux)s de la (techno)science sont toujours mentionnées séparément – bien que toutes les hypothèses fassent état d'imbrication, d'hybridité et de fusion. Les « deux origines mythiques distinctes », les deux points de vue idéaux de ce que la science est, ou devrait être, en général semblent être plus vivaces que jamais. Presque chaque déclaration faisant référence à un aspect de la science, que ce soit la science en tant qu'institution, la science comme un corpus de connaissances ou de la science comme une pratique de recherche, comprend des références explicites ou implicites à l'un ou l'autre idéal de la (techno)science. Les deux idé-e(aux)s de la (techno)science délimitent les relations spécifiques entre la science, la nature et la société, en s'appuyant sur des idées précises, non uniquement sur la science, mais aussi sur la nature et la société. La (Techno)science se caractérise soit comme autonome par rapport à, réactive à ou incorporée dans d'autres sphères de la société ; soit la connaissance (techno)scientifique pointe vers une compréhension théorique de la nature, des visions générales du monde où nous vivons ou des savoir-faire techniques pour changer nos conditions de vie ; soit la pratique de la recherche est décrite comme « lecture dans le livre de la nature », « expérimentation de la Nature » ou « construction d'artefacts ». Mais quelle est la relation entre les « deux origines mythiques distinctes » et l'actuelle (techno)science, entre les l'idée de la science des (techno)scientifiques (ou celle d'une société), la pratique (techno)scientifique et son impact sociétal ? (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 127, notre traduction).



En fait, la thèse principale de l'article de Kastenhofer et Schmidt (2011) est de dire que ces différentes formulations pointent vers des images idéales qui, en amalgamant la manière dont le monde paraît être, comment il est réalisé et comment il devrait être, exercent une influence sur de nombreux et différents niveaux ; elles préconfigurent les discours, les pratiques et les paramètres socio-épistémiques et sont elles-mêmes réalisées et réaffirmées par elles. Elles façonnent non seulement la façon dont nous parlons de la science dans les demandes de financement de la recherche et des programmes ou dans les *Science Studies*, mais aussi elles influent sur la manière dont la science se fait dans les laboratoires de recherche et ailleurs, tout comme elles s'invitent dans la façon dont les futurs scientifiques sont formés et déterminent comment les scientifiques, la science et ses produits deviennent de plus en plus importants dans les contextes sociaux.

Tenant de répondre à cette thèse principale, ils se focalisent sur trois questions centrales, telles que (1) ce que sont exactement les images idéales contemporaines de la pratique « (techno)scientifique » (comme, par exemple, la représentation et l'intervention dans le monde naturel), (2) comment l'influence de l'« idé-e(al) » (*idea(l)*) de la « (techno)science » dans la pratique de la « (techno)science » peut être conceptualisée au-delà d'une simple juxtaposition du discours sur la science contre la pratique de la science, et enfin, (3) quelle est leur pertinence dans un contexte sociopolitique. Ils abordent ces questions qu'ils considèrent comme ayant été jusque-là négligées par les discours sur la « (techno)science », ainsi que les différences possibles entre la science et la technoscience de manière indifférenciée.

Partant de ce contexte schématiquement présenté ici, ces deux d'auteurs montrent brièvement deux approches qui tentent de répondre à l'inter-relation entre les images idéales de la (techno)science et la pratique de la (techno)science. Puis, ils examinent de plus près l'idé-e(al) (techno)scientifique mis en avant dans les recherches programmatiques de Francis Bacon, Vannevar Bush et la nouvelle initiative technoscientifique Nano-Bio-Info-Cogno (NBIC), avant de reconstruire l'« idé-e(al) » de la « (techno)science » présent dans la manière de pratiquer la

(techno)science aujourd'hui. Ils soutiennent qu'il y a plus d'« idé-e(al) » de la « (techno)science » dans celle-ci que d'« idé-e(al) » de la science en tant que représentation d'une part et d'« idée(al) » de la science comme intervention, d'autre part. Ils défendent aussi l'idée que les postures d'interprétation idéalistes et les pratiques matérielles-épistémiques de la (techno)science, n'inhibent pas totalement la distinction entre les différents mondes, dans l'optique de la position défendue par Hacking que nous avons exposée longuement au chapitre V de ce texte.

Certaines actions matérielles-épistémiques sont plus proches d'une posture donnée que d'autres, autrement dit, elles font plus facilement sens par cette posture que par une autre en raison des perceptions générales spécifiques qui prévalent dans une culture particulière. Cela est d'autant plus vrai pour les combinaisons d'actions matérielles-épistémiques qui émergent et sont stabilisés en se basant sur des interprétations et des « idé-e(aux)s » spécifiques. Ils illustrent ce point en s'appuyant sur les différents contextes socio-historiques, en contrastant les développements antérieurs avec des situations actuelles ainsi que sur diverses cultures épistémiques, en contrastant différentes pratiques de recherche et les comptes rendus de leurs différents acteurs. Ils en concluent qu'il faudrait reconsidérer la relation entre les types idéaux de la (techno)science, de la pratique de la recherche (techno)scientifique et la portée sociétale de la (techno)science comme moyen d'aborder la relation entre la science, la technologie et la technoscience. (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 127-128).

En identifiant les concepts qui pourraient permettre d'analyser la relation explicite et/ou implicite entre l'idé-e(al) de la (techno)science et la pratique (techno)scientifique, la conjonction entre le discours sur la (techno)science, le discours et les présomptions implicites au sein de la (techno)science, il ressort ainsi que la pratique de la (techno)science est rarement mentionnée dans les études scientifiques actuelles. Alors que, très souvent, les phénomènes discursifs sont interprétés comme des actes principalement stratégiques en ce sens que leur performativité et leur réalité sont restreintes à la sphère de la politique scientifique.

Toutefois, les « Idées » de Lyotard et les « mythes organisateurs » de Nordmann peuvent être considérés comme des candidats possibles à la conceptualisation de l'interrelation du discours sur la science et de la pratique de la technoscience, mais ces deux approches n'ont pas encore été développées de façon plus détaillée. (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 144).

Puis, cherchant des cas empiriques dans lesquels la relation entre l'idé-e(al) de science et la pratique scientifique pourrait être visée, Kastenhofer et Schmidt ont choisi trois influents « (politique)programmes » de la « (techno)science », notamment ceux mis en avant, d'abord, par Francis Bacon au XVII<sup>e</sup> siècle, puis par Vannevar Bush après la Seconde Guerre mondiale et, enfin les initiatives récentes NBIC portées par Mihail Roco, William Bainbridge et d'autres. Et, partant des descriptions de la recherche scientifique découlant de leurs entrevues avec des scientifiques, ils se sont servis de ces exemples empiriques afin de reconstruire l'idé-e(al) de science qui se dégageait de ces comptes rendus. Ils remarquent ainsi qu'ensemble les modèles de la (techno)science de Francis Bacon et de Vannevar Bush incluent une dynamique représentationnaliste et interventionniste, mais ils les combinent de différentes façons. Selon eux, les descriptions contemporaines de la science les ont aidés à reconstruire deux autres positions différentes de la contemplative/représentationnelle et de l'interventionniste. Il s'agit de celles qu'ils nomment, respectivement, constructivistes et créationnistes. Les deux auteurs se lancent alors à la reconstruction des différentes positions leur permettant de débattre du lien entre des actions de recherche spécifiques en faisant valoir que ces positions ne font pas obstacle aux actions singulières adoptées (comme théoriser, expliquer, observer, contrôler, représenter, expérimenter, modéliser, concevoir, bâtir, construire), mais forment la façon dont ces actions font sens, se réfèrent et se combinent au sein des cultures (techno)scientifiques spécifiques. (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 145).

Bien qu'ayant procédé à une reconstruction plutôt grossière des différentes positions interventionnistes dans leur analyse, il n'en demeure pas moins qu'ils pensent que

celles-ci pourraient servir de point de départ pour répondre à certaines questions intéressantes sur le caractère et les ramifications de la technoscience, en particulier les relations entre la technoscience et le pouvoir (*power*). Ces derniers rendent compte d'une image plus colorée que ne le permettrait une double caractérisation de la (techno)science suivant les types idéaux que la représentation et l'intervention tout en soulignant la pluralité des images de la (techno)science disponibles aujourd'hui, même s'ils reconnaissent au passage que l'analyse de Hacking (1983) va bien au-delà d'une caractérisation binaire (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 145). Pour différencier la façon dont les acteurs de la politique (techno)scientifique et ceux des sciences naturelles orientent le genre de pouvoir qu'exerce la (techno)science sur le monde physique et social, ils admettent l'influence que l'idée(al) de la (techno)science exerce sur les pratiques de recherche et se sont également servis de la reconstruction des quatre positions que sont la contemplative, l'interventionniste, la constructionniste et la créationniste. Ces quatre positions ont été formulées dans le but de décrire les différents types de puissances en notant que la façon globale dont ils sont vus dépend de l'importance cruciale accordée au régime sociopolitique global (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 145).

Lors de la naissance de la science moderne, la première posture qu'est la *contemplative* (représentationnaliste) aurait été considérée comme élucidant le changement le plus radical. Changer fondamentalement le monde nous est devenu possible. Définir la place de l'humain dans le monde, collectiviser une compréhension spécifique de la condition humaine ainsi que les conditions naturelles et physiques par des catégorisations fondamentales et déterminer par quels moyens la compréhension peut être atteinte et par quels moyens la vue de la réalité devient floue et déformée seraient les principaux leviers d'action dans ce contexte. Cette posture désignée comme « contemplative » par nos deux d'auteurs pourrait donc être présentée comme un outil puissant pour la (l'auto-)discipline des esprits. L'attitude *interventionniste*, quant à elle, exercerait la puissance d'une manière plus visible et tangible. Les sources et les cibles du pouvoir seraient des entités physiques et elles seraient généralement distinctes les unes des autres,



comparables aux différents personnages impliqués dans l'exercice du pouvoir souverain. La puissance *constructiviste* pourrait être liée à la puissance industrielle de l'innovation technologique, la conception et la production. La puissance créationniste, en revanche, serait d'une autre nature puisque le pouvoir de créer de nouvelles formes de vies a, jusqu'ici, été interprété comme un acte de Dieu et du domaine de(s) Dieu(x), un résultat de l'évolution (un processus dépourvu d'acteur) ou pure fiction. Maintenant que même les scientifiques parlent de leurs recherches comme des actes de création (de nouvelles espèces et de nouvelles animations, etc.), marquant ainsi l'application de pratiques d'ingénierie au matériel biologique et aux organismes, on ne sait pas quel genre de signification socio-culturelle devrait être attribué à un tel acte (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 145-146). En effet, se demandent Kastenhofer et Schmidt (2011) :

Doit-il être compris comme « jouer à Dieu » ? Ou « bricoler la Nature » (un domaine qui devrait normalement évoluer sans l'implication des acteurs) ? Et, d'ailleurs, quel est le caractère épistémique des actes de création ? D'un point de vue épistémologique, la maxime du physicien américain Richard Feynman « ce que je ne peux pas construire, je ne peux pas comprendre » relie la posture constructiviste à une ambition épistémique. (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 146, notre traduction).

En tentant de répondre à ces interrogations, ils nous invitent à tourner notre regard vers la maxime de Francis Bacon selon laquelle la perspicacité scientifique et humaine pour contrôler et créer des phénomènes naturels sont les deux faces d'une même médaille, ce qui permet de relier les postures interventionniste et constructiviste à une pratique épistémique. Mais, cela ne répond pas à la question du lien entre la création et la connaissance scientifique. Pour Kastenhofer et Schmidt, c'est Hohlfeld (1988, p. 64) qui offre la meilleure perspective de réponse lorsqu'il lie le récit de Bacon à la recherche qu'ils qualifient de créationniste. En effet, celui-ci soutient que « les généticiens peuvent difficilement ajouter quelque chose au programme idéal de Bacon, la seule différence est : ils peuvent désormais le réaliser ». (Notre traduction de la traduction anglaise de Kastenhofer et Schmidt). L'on pourrait aussi soutenir que le programme de Bacon ne distingue pas épistémologiquement ou ontologiquement entre la construction et la création ou les

mondes physique et vivant, il établit plutôt une distinction entre les lois et les phénomènes. (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 146).

D'un autre côté, le caractère créationniste de la nouvelle technoscience pourrait être considéré comme une simple exagération rhétorique, mais il serait réducteur d'interpréter les programmes de la technoscience uniquement de cette façon, bien que les relations entre parler de la technoscience et faire de la technoscience soient complexes et multiples. Nous avons vu plus haut que le concept d'Idée de la technoscience de Lyotard construite sur les Idées régulatrices de Kant et le concept de « mythes orientationnelles » de Nordmann sont utiles comme des points de mire pour conceptualiser cette relation, surtout parce qu'ils permettent de conclure que les technosciences n'ont jamais réalisé pleinement l'une des quatre puissances décrites plus haut. Néanmoins, pour eux, la relation entre l'idé-e(al) de la (techno)science plurielle, tel que présenté par Hacking (1983), la pratique (techno)scientifique et les contextes socio-politiques méritent davantage de considération systématique si la relation entre la technoscience et la puissance doit être comprise plus en profondeur, en intégrant les discours épistémologiques, ontologiques et régulateurs.

Quant à leur ambition de sonder la notion de technoscience, ils concluent que la réalisation d'un-e idé-e(al) créationniste dans les pratiques de la recherche pourrait marquer une nouvelle ère. Et, peut-être plus important encore, ils pensent pouvoir observer un changement dans le contexte dans lequel ces quatre positions différentes font sens et sont poursuivies. Ce changement est si fondamental qu'il est difficile à cerner lorsque l'on examine les pratiques matérielles individuelles et la production technoscientifique qui s'appuie sur les succès scientifiques antérieurs. Mais il devient évident dans les textes explicatifs qui accompagnent la science et la technoscience, dans les ensembles actuels de recherches multidisciplinaires et dans les voies par lesquelles la (techno)science fait sens dans la société (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 147).

D'un autre côté, l'enchevêtrement entre science et technologie catalysé par l'avènement de la manipulabilité à l'échelle nanométrique a interpellé de plus en plus de philosophes depuis le début des années 2000. C'est ainsi que de nouveaux concepts ont été composés afin de coller à la nouvelle réalité nanotechnoscientifique, ou simplement technoscientifique, comme « technologie nouménale<sup>86</sup> » (*noumenal technology*) (Nordmann, 2005) dont le paradigme par excellence selon Nordmann est celui des Organismes Génétiquement Modifiés (OGM), « mythe organisateur » (*organising myth*) selon lequel l'âge de la technoscience est tout aussi mythique que celui de la science qui l'a précédée, la première n'étant pas un objet ou un état, mais une « vision *organisatrice* », une conviction qui établit des idéaux alternatifs et co-forme l'action dans une mesure indéterminée par son influence sur les attentes et les priorités, à l'instar du mythe puissant de la science comme legs du Siècle des Lumières (Nordmann, 2010), et l'idée de « connaissance matérielle » (*thing knowledge*) que nous avons déjà évoquée dans notre introduction et au sous-chapitre 4.2.2 (Baird, 2003/2004).

Selon Kastenhofer et Schmidt (2011, p. 132) l'idée de « mythe organisateur » implique que lorsque le discursif et le pratique se rencontrent, ils sont presque également réels et formateurs. En effet, soutiennent-ils :

Lorsque nous concevons la science non seulement comme un système de connaissances théoriques absolu, mais aussi comme une entreprise pratique discursive et sociale, « Idées régulatrices », « types idéaux », « récits », « cadres », « paradigmes » et « mythes organisateur » à l'intérieur et à propos d'une science qui rend possible et forme non seulement la perception et la compréhension du monde, mais aussi

<sup>86</sup> Selon Nordmann, en effet : « Les *noumènes* sont distincts des *phénomènes*. Alors que ces derniers sont les choses telles qu'elles nous apparaissent et que nous les vivons, les *noumènes* sont les philosophiquement infâmes et mystérieuses choses-en-soi. La « technologie *nouménale* » mentionnée dans le titre de cet article apparaîtrait donc comme une contradiction dans les termes : la technologie est une création humaine qui implique la connaissance humaine et sert les besoins humains ; ceci l'enracine fermement dans des phénomènes et il semble absurde de parler de technologie qui existe au-delà de la perception humaine et d'expérience parmi les choses-en-soi. Le monde *nouménal* est de nature incomprise, inexpérimentée, et incontrôlée, c'est la nature au sens de non cultivée, d'étrange altérité (*uncanny otherness*). En parlant de la « technologie *nouménale* » cet article soutient que certaines technologies se dérobent à l'appréhension humaine, à sa perception et son contrôle, et donc revêtent le caractère de cette étrange altérité. » (Nordmann, « Noumenal Technology : Reflections on the Incredible Tininess of Nano » in *Techné* 8:3, Printemps 2005, p. 3, notre traduction).

comment les scientifiques interagissent avec le monde et comment cette interaction gagne du sens. Et, plus le regard sociétal et scientifique se déplacera vers (la gestion de) un avenir (a-historique) (cp. Nordmann 2010), plus les récits technoscientifiques spécifiques vont gagner en territoires relativement aux pratiques épistémiques et matériels et à leurs résultats. (Notre traduction).

Du coup, les conceptions de la science comme entreprise représentationnelle et celles de la science comme entreprise d'intervention peuvent être comprises comme des Idées régulatrices, des types idéaux, des cadres narratifs ou des mythes organisateurs. Ces deux façons d'en rendre compte pointent vers différents-*es* idé-*e*(aux)s de la science basé-*es* sur différentes représentations de ce qu'est la science et/ou ce vers quoi elle devrait tendre. Elles racontent différentes histoires sur la relation entre la science et le monde physique (représentationnelle ou interventionniste). Celles-ci sont parfois liées aux différents rôles sociétaux et aux significations de la science (classique, humaniste ou la puissante technoscience). Ils peuvent être considérés comme s'excluant mutuellement dans les discours à propos de la science, notamment dans la philosophie de la science, les *sciences technology and society* (STS) ou le discours politique de la science.

Représentationnalisme et interventionnisme perçus comme idé-*e*(aux)s s'excluent mutuellement dans le sens où les idées sont généralement investies de compétence absolue pour l'interprétation de la constellation spécifique qu'ils portent (dans le cas des idéaux de la science : la relation entre la science, le monde physique et la société) et que ces idéaux ne peuvent guider les actions et les décisions que quand ils sont sans équivoque. C'est pourquoi, pour Kastenhofer et Schmidt, maintenir explicitement deux idé-*e*(aux)s différents-*es* sur la même constellation en même temps pourrait paraître schizophrène ou ambigu. Pourtant, dans la pratique quotidienne les actions argumentatives et matérielles reflètent tout le temps les orientations vers plusieurs idé-*e*(aux)s différents-*es* au sein de la même communauté ou d'un même champ d'action. Ces orientations multiples sont administrées de diverses façons, par exemple en essayant de concilier différents-*es* idé-*e*(aux)s au sein d'un nouvel idéal qui les comprendrait, en différenciant les divers contextes d'actions et en attribuant sélectivement des idé-*e*(aux)s



différents-es à ces divers contextes et/ou par un régime explicitement prospère d'idé-e(aux)s pluriels. Selon ces deux auteurs, le programme de Bacon a déjà tenté de créer un lien de production de la connaissance scientifique et du pouvoir technologique au sein d'un nouveau paradigme qui consistait à combiner « apport de lumière » et « apport de fruits ». (Kastenhofer et Schmidt, 2011, p. 132).

Jean-Marc Lévy-Leblond, en revanche, se demande si la technologie ne va pas étouffer la science. Comme pour faire écho aux inquiétudes de Lévy-Leblond, rappelons que le rapport 2007 de l'UNESCO à ce sujet admettait ceci :

Pour commencer, doit-on parler des nanosciences ou de nanotechnologies ? Tout au long du présent document, le terme « nanotechnologies » est utilisé pour désigner aussi bien la recherche scientifique fondamentale que la recherche appliquée. De nombreuses activités que l'on serait tenté de qualifier de « fondamentales » n'en font pas moins appel à des outils, des savoir-faire, des matériaux et des techniques qui, a priori, relèvent essentiellement de la technologie (ordinateurs, logiciels, microscopes complexes et appareils pour effectuer des mesures et des manipulations physiques et chimiques). De même, un grand nombre d'activités, que l'on pourrait ranger comme appartenant à l'ingénierie étant donné qu'elles impliquent la mise au point de dispositifs ou de machines, est considérée aujourd'hui par les scientifiques comme « recherche fondamentale » en mécanique de la nature. De ce fait, dans le domaine des nanotechnologies, les sciences et les technologies sont étroitement liées et interdépendantes.

La distinction habituelle entre recherche « fondamentale » et recherche « appliquée » pose également des difficultés en matière de nanotechnologies puisqu'elles amènent à confondre la *recherche effective menée par les scientifiques et les ingénieurs* avec les retombées qu'en escomptent les observateurs, les promoteurs, les bailleurs de fonds et les scientifiques enthousiastes. On confond très souvent, lorsque l'on parle de nanotechnologies, leurs résultats – à savoir leurs bénéfices éventuels et les risques potentiels – avec l'état actuel des connaissances dans les laboratoires et les entreprises. (Rapport UNESCO 2007, p. 5)

Par ailleurs, nous avons vu que certains spécialistes confortés par la célèbre loi de Gordon Moore (1975) évoquent le déterminisme technologique (miniaturisation) pour définir les nanotechnologies, alors que d'autres se réfèrent à la tradition épistémologique pour diviser les nanotechnologies en « nanoscience » et « nanotechnologie » (Ratner, 2003), reprenant ainsi la distinction classique entre science et technologie. Nous considérons l'activité scientifique comme une rationalité toujours confrontée à des rationalités qui lui sont externes tout en étant susceptibles de la déterminer directement ou indirectement. La rationalité interne

aux sciences est souvent tributaire de ce que l'on pourrait considérer comme une rationalité externe, mais susceptible d'être décisive pour l'activité interne. Toute la question des enjeux se trouve ainsi formulée à travers les différentes logiques rationnelles. Ces dernières sont décelables dans les nombreuses définitions en compétition autour des nanotechnologies et qui ne leur sont pas nécessairement incompatibles ou contradictoires.

Nous avons terminé notre analyse en envisageant la possibilité, induite des « nanotechnologies », d'intégrer une rationalité traditionnellement externe, telle que la raison technologique, non pas en amont ni en aval, mais comme partie intégrante. Elles deviennent ainsi une discipline hybride, lieu d'enchevêtrement entre les sciences et les technologies. D'où l'idée de « technoscience » ou de « nanotechnoscience », plus à même de rendre compte de cette réalité intrinsèque aux nanos. Nous estimons qu'en cela, elles sont comparables *mutatis mutandis* aux actes de discours théorisés par Austin (1962). Dans ce rôle, les technologies « embarquées », loin d'étouffer les nanosciences, en seraient une partie intégrante et constitutive de leur qualité épistémique. Kastenhofer et Schmidt (2011) montrent bien qu'il y a certes différentes manières de « changer le monde » par la contemplation et la représentation, l'intervention et le contrôle, l'ingénierie, la construction et la création, mais le caractère hybride de la technoscience rend difficile, voire impossible, de séparer la production de la connaissance des interventions du monde réel. Une telle perspective, remarquent-ils, met en question fondamentalement les approches actuelles de la politique de la science et de la technologie.

C'est dans cette optique que nous avons souscrit à cette autre façon de rendre compte de l'enchevêtrement quasi consubstantiel entre science et technologie dans le nanomonde, celle qui consiste à le qualifier, comme le fait Gilbert Hottois (et Bruno Latour après lui), de « technoscientifique » ou de « nanotechnoscientifique », comme nous préférons le faire après Nordmann (2004, 2008a). La quasi-fusion qui en découle rappelle les liens étroits qui ont toujours marqué certains types de

discours qualifiés d'actes ou de performatifs parce qu'ils accomplissent précisément des choses dans un sens différent de la manière dont nous les considérons habituellement comme accomplies. Afin d'approfondir cette référence au langage, nous allons risquer d'abord l'analogie entre les nanotechnosciences et l'idée de « contexte de performance oral », qui n'est pas sans rappeler la performativité austinienne, développée par le philosophe africain Mamoussé Diagne avant d'examiner le lien que nous établissons avec les actes de discours.

Revenant sur la célèbre affirmation de Léopold Sédar Senghor (1906-2001) selon laquelle « l'émotion est nègre et la raison hellène<sup>87</sup> », Diagne soutient dans sa *Critique de la raison orale* ce qui suit :

Certains auteurs ont cru pouvoir caractériser les Noirs comme des hommes de l'émotion et de l'affectivité débordante, ne se doutant pas qu'il y avait peut-être simplement là une des incidences les plus remarquables de l'oralité. La permanence du contexte de performance oral dans lequel baignent les sujets et ses « effets psychiques durables » ne requiert, de ce fait, aucune catégorisation en termes d'essence. La preuve en est que le théâtre ou les récitals publics, ainsi que la pédagogie moderne les exploitent à fond y compris dans les civilisations de l'écrit<sup>88</sup>.

*Mutatis mutandis*, ces propos pourraient s'appliquer aux nanotechnosciences à propos desquels il ne serait pas impertinent de parler d'une sorte de permanence du contexte de performance technologique. La permanence de ce contexte dans lequel baignent les acteurs pourrait laisser penser qu'il y aurait une relation ontologique entre science et technologie à l'occasion de leur enchevêtrement dans les nanotechnosciences en particulier. Mais, il n'en est rien puisque le moment de

<sup>87</sup> Léopold Sédar Senghor écrit dans le chapitre intitulé « Ce que l'Homme noir apporte » de l'ouvrage collectif *L'Homme de couleur* paru chez Plon en 1939, vol. 295 : « Sensibilité émotive. L'émotion est nègre, comme la raison hellène. Eau que rident tous les souffles ? « Âme de plein air » (I) battue des vents et d'où le fruit souvent tombe avant maturité ? Oui en un sens. Le Nègre aujourd'hui est plus riche de dons que d'œuvres. Mais l'arbre plonge ses racines loin dans la terre, le fleuve coule profond, charriant des paillettes précieuses ». Reproduit dans *Liberté I : Négritude et humanisme* (1964).

<sup>88</sup> Mamoussé Diagne, *Critique de la raison orale : les pratiques discursives en Afrique noire*, Éditions Khartala, 2005, p. 182. Selon le commentaire que l'auteur fait de ce passage, « c'est ainsi que dans la chanson de geste (comme elle devait être récitée), existe, selon Zumthor, « une tension entre son "moment lyrique" et son "moment narratif" ». Selon cet auteur, « il en résulte une efficacité particulière, dans l'ordre de la persuasion et de l'éveil du désir » (1985, p. 173). » *Ibid.*, note de bas de page, p. 182.



l'expérimentation dans les nanotechnosciences, tout comme celui du recours à l'image dans l'orature, correspond à l'heure cruciale de la médiation. En effet, selon Diagne :

Le passage par l'univers des analogies symboliques est la médiation, moyen terme par lequel le non-initié accède à un niveau de réalité ou de connaissance à partir de ses pré-requis. L'image ou la dramatisation qui les met à sa portée constitue justement l'artifice par lequel ce qui ne lui était pas accessible le devient par les moyens de l'illustration et de la mise en scène. Si toute *païdéia* est un compromis avec le principe de la médiation, c'est parce que son objectif stratégique est de rendre accessible l'inaccessible. Pour cela elle doit commencer par « le mimer dans l'accessible », selon la belle formule de Michel Serres. (Diagne, 2005, p. 176).

Aussi, les nanotechnosciences, telles que nous les connaissons aujourd'hui, constituent-elles un moment crucial (au sens de la *crux* ou *crucis*, du carrefour des chemins) du développement des nanosciences et des nanotechnologies. Elles s'imposent comme moments de passage ou médiatrices privilégiés entre l'inaccessible ou le non-encore-accessible du nanomonde et sa théorisation ou son expression technologique achevée, ou son *entéléchie*, pour parler comme Aristote. On peut dire qu'autant le but de l'orateur est de « faire passer quelque chose du non-connu au connu, et quelqu'un du statut d'inculte à celui d'initié » (Diagne, 2005, p. 177), autant le but du « chercheur » est de faire advenir de l'inconnu quelque chose de connaissable. Cela fait que les nanotechnosciences assument une double fonction, à la fois expérimentale (pour prouver ou faire quelque chose) et heuristique (pour trouver quelque chose).

Terminons sur une autre analogie dans le même registre en nous référant cette fois-ci aux nanotechnosciences comme performatifs. Bruno Ambroise nous explique que :

Les performatifs forment d'une certaine façon la première strate de toute la constellation d'activités linguistiques mises au jour par Austin. On les identifie en montrant que certains énoncés sont tout à fait sensés, sans pour autant répondre aux canons véri-conditionnels posés par le positivisme logique : ils sont



grammaticalement bien formés, ils ont d'ailleurs la forme d'assertions, mais ils n'affirment rien que l'on puisse vérifier. (Austin, 1979a, p. 234-252).

En réalité, ces énoncés ne disent pas tant quelque chose (à trouver dans le réel) qu'ils ne font quelque chose (et généralement, ce qu'ils disent faire). Ainsi, lorsque quelqu'un dit : « Je te promets de faire *x* », il ne s'agit pas de décrire le fait que je promets de faire *x* (puisque précisément, je ne l'ai pas *encore* fait), mais bien de faire *x en disant* que je le fais. Le sens de ces énonciations ne se réduit pas à décrire le monde, comme le croient les philosophes sous le coup de « l'illusion descriptive », mais consiste plutôt à accomplir quelque chose dans le monde, c'est-à-dire à y introduire une *modification*. C'est bien cela qui inspire ce commentaire de Denis Vernant selon lequel « un acte de discours est un acte susceptible de réussir ou d'échouer. » (Austin, 1970, p. 118). De l'avis d'Austin :

Alors que « l'illocution est un acte qui, *en plus* de tout ce qu'il fait en tant qu'il est aussi une *locution* (i.e. en tant qu'il *dit* quelque chose), produit quelque chose EN disant (d'où le préfixe *il*). » L'acte perlocutoire peut inclure d'une certaine manière des conséquences – ainsi lorsque nous disons « Par l'acte *x*, je faisais *y* ». L'acte, en réalité, entraîne toujours des conséquences considérables (plus ou moins considérables) et certaines d'entre elles peuvent être imprévues [*unintentional*]. Il n'y a pas de limite à l'acte physique minimum. Que l'acte lui-même comporte la série indéfiniment longue de ses « conséquences », c'est là – ou ce devrait être – un lieu commun essentiel de la théorie du langage qui touche à l'« action » en général. (Austin, 1970, p. 118).

Le philosophe du discours nous recommande de distinguer l'illocutoire du perlocutoire et de faire la différence entre « en disant cela, je l'avertissais » et « par le fait de dire cela, je le convainquis, le surpris, le retins » (Austin, 1970, p. 119). En effet pour lui, « J'ai ordonné et il a obéi » diffère de « Je l'ai fait obéir » puisque cette dernière formule implique que d'autres moyens, supplémentaires ont été employés pour que la conséquence puisse m'être attribuée. Il entend ainsi les incitations, et même l'influence personnelle comme équivalant à une contrainte. « Très souvent même intervient un acte illocutoire distinct du simple commandement : « Je le lui ai fait faire en affirmant *x*. » » (Austin, 1970, p. 125). Par analogie, on pourrait penser les nanotechnosciences comme cet espace illocutoire et perlocutoire où les hypothèses et les applications technoscientifiques

peuvent contribuer à l'issue technologique ou scientifique qui pourrait en découler. Dans la même optique, un parallèle est possible entre l'acte perlocutoire et les méthodes de la technologie qui cherchent à créer des dispositifs dans le but de leur faire accomplir des tâches précises.

Enfin, la complexité des relations découvertes par Austin ne nous autorise pas à simplifier à outrance l'analogie possible entre science et acte illocutoire tout comme technologie et acte perlocutoire, mais nous avons des raisons de penser qu'une telle perspective mériterait d'être approfondie... En outre, les nanotechnosciences se distinguent de la science « pure » autant que les performatifs se démarquent des assertifs et des constatifs. En fait, dans cet univers de l'infiniment petit, il n'est plus question vraiment de vérité ou de fausseté, mais plutôt, à l'instar des actes illocutoires, de réussite ou d'échec.

Ambroise (Thèse de Doctorat, 2005) considère qu'il s'agit d'utiliser les mots d'un vocabulaire donné dans des constructions grammaticales d'une langue afin de vouloir dire quelque chose, soit que l'on signifie par-là quelque chose, soit que l'on fasse par-là référence à quelque chose. Cela l'amène à inférer que l'on se situe désormais dans une problématique de l'usage des mots ou d'un langage, c'est-à-dire au niveau de ce qu'Austin appelle « la parole », et non plus simplement de l'itération de termes appartenant à un langage donné. Et cet usage a une fin : signifier quelque chose ; alors que pour les nanotechnosciences à l'instar des « déclarations » searliennes, il s'agit de faire quelque chose tout en étant capable à tout moment de produire des explications, ou des dispositifs matériels socialement ou scientifiquement orientés selon les cas et les besoins. À ce titre, les nanotechnosciences sont une sorte de contexte de performativité favorable à la fois à l'émergence des théories et des technologies. « L'illocution est un acte qui, *en plus* de tout ce qu'il fait en tant qu'il est aussi une *locution* (i.e. en tant qu'il *dit* quelque chose), produit quelque chose EN disant (d'où le préfixe *il*). » Il peut être décomposé en promissifs et en expositifs. Des premiers, voici ce que nous dit Austin :

La troisième classe, celle des promissifs, est caractérisée par le fait que l'on promet, ou que l'on prend en charge quelque chose. Ces énonciations nous *engagent* à une action, mais elles comportent aussi des déclarations ou manifestations d'intentions, qui ne sont pas proprement des promesses, ainsi que des attitudes assez vagues qu'on pourrait appeler des « épousailles » (le fait de se ranger du côté de quelqu'un par exemple). Il est clair que cette classe entretient des rapports avec les verdictifs et les exercitifs. (Austin, 1962, p. 154).

Quant aux seconds, les expositifs, pour lui ce sont des énonciations servant à *exposer* une façon de voir les choses, à développer un argument, à clarifier l'usage que l'on fait des mots, ou cela même à quoi ils renvoient (Austin, 1962, p. 154). À ce titre, à notre avis, en tant qu'illocutoire, ils sont comparables aux théories scientifiques. Comparant les promissifs aux *expositifs*, Austin estime que :

Jurer, promettre, garantir qu'il en est ainsi, sont des actes qui fonctionnent comme des expositifs. Donner tel nom, définir, analyser, et tenir pour établi, d'une part ; donner son appui, se dire d'accord, désapprouver, maintenir, et défendre, d'autre part, forment deux groupes d'illocutions qui semblent à la fois expositifs et promissifs. (Austin, 1962, p. 160).

Faisant la synthèse de sa réflexion sur sa classification, Austin considère que l'« on peut dire, en résumé, que le verdictif conduit à porter un jugement, l'exercitif à affirmer une influence ou un pouvoir, le promissif à assumer une obligation ou à déclarer une intention, le comportatif à adopter une attitude, l'expositif à manifester plus clairement ses raisons, ses arguments, bref à élucider la communication. » (Austin, 1962, p. 163). En dépouillant les univers lexicaux des cinq classes d'énonciation, on se rend compte que la plupart des actions décrites par l'activité nanotechnoscientifique pourrait appartenir au même univers lexical que l'expositif, le promissif, l'exercitif et le verdictif à des degrés divers. En effet, en nanotechnoscience aussi, on « répond », on « démontre », on « concède », on « illustre », on « tient pour acquis » et on « pose comme postulat » (Austin, 1962, p. 153-154), mais aussi on essaie, on crée, on teste, etc. Dans l'univers de Recherche & Développement Nanotechnoscientifique (R&DNTS), il n'est plus question de vérité ou de fausseté, mais plutôt, à l'instar des actes illocutoires et des perlocutoires

hormis pour les assertifs, de réussite ou d'échec. Il importe de citer une dernière fois Austin afin de clore provisoirement notre présent propos :

Distinguer : « J'ai ordonné et il a obéi » de « Je l'ai fait obéir ». Cette dernière formule implique que d'autres moyens, supplémentaires ont été employés pour que la conséquence puisse m'être attribuée : incitations, et même (fréquemment) influence personnelle équivalant à une contrainte. Très souvent même intervient un acte illocutoire distinct du simple commandement : « Je le lui ai fait faire en affirmant x. » (Austin 1962, p. 125).

Enfin, si l'on tient compte de la présente précision d'Austin, on pourrait considérer les nanosciences comme cet espace performatif où les hypothèses et les applications « technologiques » peuvent influencer ou produire une issue qui peut être technologique ou scientifique. On pourrait, il nous semble, dire la même chose de la science théorique aussi. C'est ce qui rendrait possible son ustencilisation par la technologie. Dans la même optique, il existe une certaine convergence entre les nanotechnologies et l'acte perlocutoire. Celles-ci adoptent les méthodes de la technologie cherchant à créer des dispositifs dans le but de leur faire accomplir des tâches précises. Bien entendu, ces questions pourront faire l'objet d'un traitement plus approfondi dans une optique heuristique similaire à celle que donne Austin à sa philosophie des actes de discours. Toutefois, nous devons retenir les critiques qui lui ont été adressées autant par Vanderveken que Vernant sur le caractère monologique de son analyse qui, selon eux, se centre trop exclusivement sur l'acte du seul locuteur.

Dans le but de jeter les bases d'une philosophie digne des nanotechnosciences, nous suivrons les pistes tracées par Denis Vernant (2009) dans *Discours et vérité*. Cependant, alors que ce dernier est préoccupé par la vérité qu'il tente de fonder en suivant la piste des Mégariques qui concevaient déjà la pragmatique des actes véridictionnels comme une étape dans le processus d'établissement du vrai qui est de nature foncièrement dialogique, la partie des nanos qui nous intéresse s'évalue principalement en terme de réussite et d'échec. Le but du philosophe français, en effet, est d'établir le vrai en explicitant les règles formelles d'un jeu véridictionnel



qui rend compte aussi bien de la validité logique que des vérités empiriques, des dialogues idéaux que des discussions prosaïques, par sa logique dialogique de la véridicité (Vernant, 2009, p. 9). Celle-ci prend ses distances d'avec la façon monologique dont, estime-t-il, on a trop souvent traité la question de la vérité, tout comme elle se démarque de l'idée aristotélicienne selon laquelle la validité d'un raisonnement dépendrait de sa correspondance à un fait, et celle des Stoïciens qui veut qu'un raisonnement ne soit valide que s'il est conforme à la forme canonique d'une trope (Vernant, 2009, 155). C'est ainsi que Vernant accuse l'oubli du fait que la vérité résulte toujours d'un processus de recherche qui repose sur l'interrogation et le questionnement, entre autres, autrement dit le dialogue. À l'instar des Mégariques, donc, le philosophe grenoblois estime que tout usage de la rationalité serait dialectique, en d'autres termes, dialogique. C'est cet aspect de la recherche de la vérité que souhaite préciser Vernant avant de proposer sa logique de la véridicité qu'il veut apte à rendre compte tant de la dimension formelle de la validité que celle matérielle de la vérité. En ce qui nous concerne, la dimension transactionnelle de la véridicité développée par le philosophe français nous paraît particulièrement intéressante pour la philosophie des nanotechnosciences que nous souhaitons sortir de l'impensé des théories philosophiques sur la technoscience en général, mais sur les nanos en particulier. En fait, pour l'auteur de *Discours et vérité* :

La *véridicité* résulte d'un *accord dialogique* qui suppose au niveau interactionnel que les interlocuteurs reconnaissent leur consistance mutuelle et au niveau transactionnel qu'ils acceptent mutuellement le jugement d'un tiers qui atteste la vérité des propositions atomiques sur le monde en question. Il importe donc de construire un système de dialogue qui permette d'apprécier conjointement la validité logique des raisonnements ainsi que la vérité matérielle des propositions atomiques en cause par appel à une procédure de vérification externe communément reconnue comme tiers-juge. (Vernant, 2009, p. 157).

Bien que suggestive, la conception du praxéologue ne nous semble pas prendre suffisamment en compte toute l'importance que pourrait revêtir la transaction dans l'optique d'une philosophie des nanotechnosciences, par exemple. Selon nous, plutôt que d'être une finalité, comme le conçoit le philosophe grenoblois, la transaction serait un moyen et non une fin. En effet, nous pensons que dans la

perspective de la construction d'une « nanophilosophie », il serait essentiel de considérer tous les aspects susceptibles de traiter la question dans sa complexité. C'est pourquoi, en plus de devoir traiter l'enchevêtrement *sui generis* des nanotechnosciences, il faudrait considérer sa dimension interactionnelle et transactionnelle tant interne qu'externe. En effet, comme le dit fort à propos Jan C. Schmidt (2011), les perspectives internaliste et externaliste (société, économie) sur la science sont entrelacées. « La connaissance technoscientifique est supposée être, à long terme, un instrument adéquat pour obtenir un avantage concurrentiel sur le marché mondial, afin d'assurer la croissance et la richesse, et résoudre des problèmes sociétaux. » (Schmidt, 2011, p. 108-109, notre traduction). Nous présumons aussi que dans l'activité nanotechnoscientifique, l'interaction, comme l'a si bien vu Robert (1993) est à la fois verticale et horizontale, mais la transaction, loin d'être une fin sert la Recherche et Développement Nanotechnoscientifique (R&DNTS) ou la dessert, selon l'intérêt qu'elle suscite auprès de la société, des politiques, des bailleurs de fonds, des industriels, des communautés technoscientifiques et des moyens technologiques du moment. C'est au terme des interactions transactionnelles qui peuvent impliquer, à l'externe, toutes ces parties ou certaines d'entre elles que l'activité technoscientifique en interne devient possible, même si cet engouement ne garantit en rien le succès des entreprises de recherche et développement visées, à tout le moins les rend-elle possible. Ceci signifie un lien entre le contexte de découverte et celui de la justification telle que l'on peut parler d'enchevêtrement, d'autres préfèrent parler d'entrelacement (Schmidt (2011)). Le succès du second dépend quasi intrinsèquement du degré d'implication collaborative du premier et de l'issue des transactions entre les différentes parties concernées.

À cet égard, nous convenons avec Vernant (2009, p. 217) que « la connaissance n'est pas contemplation pure, exercice exclusivement intellectuel, mais *activité* fondamentalement intéressée, *pratique* interactionnelle et transactionnelle. » En tant qu'interaction, elle s'avère procédure intersubjective et dialogique de constructions symboliques et rationnelles. Et, dans sa dimension transactionnelle,

elle se déploie en un constant échange actionnel co-construit pas les agents. Ainsi, d'un point de vue biologique, la transaction produit les systèmes d'adaptation de l'organisme à son environnement, considérée sous le paradigme de la science, elle est méthodologiquement et technologiquement réglée par l'expérimentation ou ce que nous qualifierons d'exploration, soumises aux intérêts culturels, économiques ainsi que socio-politiques du moment. De ces constatations, Vernant déduit que nous ne pouvons appréhender nos mondes qu'à travers des constructions symboliques et sub-symboliques, que ce soient les stratégies perceptives que l'humain a élaborées au cours de son évolution, ou les théories scientifiques les plus sophistiquées. Ceci fait de nos versions de mondes des modalités provisoires, plurielles et contingentes « par lesquelles nous opérons nos inter- et transactions dans les mondes que nous partageons. » Toutefois, le praxéologue français distingue deux types de transactions : la première, « intersubjective » se définit comme le mouvement par lequel les interlocuteurs se reconnaissent mutuellement comme co-locuteurs dans leurs dimensions psychologique, sociale, idéologique et autres, tout en construisant ensemble une image commune de leur monde ; la seconde « intramondaine met en cause le rapport des co-agents au problème [*aufgabe*] qu'ils rencontrent dans la situation qu'ils partagent. » (Vernant, 2009, p. 142). Mais, selon Vernant, il est important de prendre ce dernier niveau comme le seul qui assigne un *sens praxéologique*, autrement dit une fonction pratique, aux objets qui conditionnent notre activité quotidienne (Vernant, 2009, p. 219). Moins préoccupé par la vérité qui porte sur ce qui est dit que par la véridicité du dire, c'est-à-dire l'acte d'énonciation assumé par le locuteur, Vernant soutient que l'établissement de la vérité scientifique résulte d'un effort intersubjectif, voire collectif, de ce qu'il nomme, selon l'expression empruntée à Bachelard, l'« union des travailleurs de la preuve » qui associe les membres de la « société théoricienne » et ceux de la « société technique ». C'est ainsi que se produit un monde nouveau, une *phénoménotechnique*, tel que le qualifie Bachelard dans le *Nouvel esprit scientifique*, né du travail à face de Janus, à la fois théorique et pratique, déductif et expérimental. De cette combinaison découle la construction progressive et effective de la réalité scientifique. Le philosophe grenoblois nous invite d'ailleurs à noter que

cette activité scientifique de création de monde arpente les formes dialogiques en s'ouvrant toujours sur une question (Bachelard, 1967) qui à son tour suscite un problème (Laudan, 1977). La question se déploie alors en un dialogue entre raison et expérience qui fait que peu importe le point de départ de l'activité scientifique, celle-ci ne peut pleinement convaincre qu'en quittant son domaine de base. Selon l'heureuse formulation de Bachelard, « *si elle expérimente, il faut raisonner ; si elle raisonne, il faut expérimenter* ». L'on comprend mieux alors le parti-pris de Vernant pour qui expérience première et expérimentation scientifique ne sauraient se confondre, tout comme réel fantasmé se distingue de réalité déduite et construite. Ceci finit de conforter le logicien isérois dans l'idée que « la vérité scientifique est bien le résultat d'un double effort : *interactionnel* pour élaborer des hypothèses et établir déductivement des lois, *transactionnel* pour construire expérimentalement les faits. » (Vernant, 2009, p. 222).

Partageant jusqu'à un certain point l'idée du praxéologue selon laquelle l'on ne saurait séparer les deux dimensions du dialogue que sont l'interaction qui se combine à la transaction qui lui donne sens sans, selon nous, en être la finalité, en revanche, nous convenons avec lui qu'il serait idéaliste de croire qu'il existerait des dialogues purement rationnels entre agents libérés de toute attache et de toute préoccupation prosaïques. D'autre part, comme lui, nous admettons la possibilité que la véridicité s'exprime dans et par la langue, le discours et le dialogue et que sa sanction requière la sanction du niveau transactionnel de nos pratiques collectives qui gouvernerait nos rapports mutuels de même que notre relation conjointe au monde que nous co-construisons. Cependant, même si, à l'instar du sens et de la référence, la vérité se construit dans et par l'interaction dialogique, à notre avis, contrairement à ce que soutient Vernant, elle ne recevrait pas sa sanction dans les transactions qu'opèrent les agents dans le monde dans lequel ils co-agissent (Vernant, 2009, p. 231) puisque celles-ci ne sont pas des fins en-soi, mais bien des moyens susceptibles de déterminer l'échec ou la réussite des objectifs protéiformes propres à chaque partie prenante visés à travers elles. Les finalités d'une transaction sont multiples par définition et reflètent la diversité des intérêts « monnayables »



des acteurs en présence. Toutefois, nous n'avons aucun mal à convenir du fait que les transactions soient à la base des interactions humaines. Nous interagissons en vue de réaliser un ou plusieurs objectifs, et à cette fin une négociation *a minima* bipartite sous forme d'interaction est nécessaire.

Il peut y avoir des perdants, des gagnants ou des « ni-perdants-ni-gagnants » dans une transaction qui peut ainsi être équitable ou carrément déséquilibrée, faite au détriment de l'une ou plusieurs des parties en présence. Toutefois, il arrive qu'elle soit relativement satisfaisante pour toutes les parties. Cette dimension transactionnelle des relations humaines est exacerbée dans les politiques changeantes de la science qui sont fonction des résultats promis et attendus de part (technoscientifiques) et d'autres (politiques, industriels, investisseurs, etc.). Ainsi, dans une négociation impliquant d'un côté les chercheurs avec leurs promesses et de l'autre les parties de la société intéressées par celles-ci pour au moins autant de raisons qu'il pourrait y avoir de parties prenantes, la transaction se fait en amont et s'effectue ainsi en externe relativement à l'activité technoscientifique proprement dite. Afin de travailler sur un projet quelconque ou d'en faire avancer un, le technoscientifique a besoin de financement, ce qui le sort de façon récurrente de son domaine d'objectivité habituel et l'amène à faire de la communication autour de ses activités en recourant à la vulgarisation et à des projets à la pertinence parfois douteuse. Le but du jeu est de susciter l'intérêt pécuniaire, social ou politique susceptible d'ouvrir la porte des budgets alléchants et de nature à maintenir les activités (centres d'intérêt) des chercheurs à flot.

L'autre transaction quant à elle se passe à l'interne, entre le technoscientifique, ses théories, ses technologies et ses objets. Une fois le crédit nécessaire accordé à son projet et les financements requis versés, un autre genre de négociation attend les chercheurs. Il s'agit d'une négociation entre l'humain et la Nature que l'on pourrait qualifier de transactionnelle, mais à visée objective dans la mesure où les résultats escomptés par les acteurs dépendent à la fois de leurs projets, des connaissances dont ils disposent, de leur créativité, de la qualité des instruments dont ils se servent

et de la nature de leurs objets. Bien qu'en interne seule la subjectivité des chercheurs soit engagée, ils sont quand même confrontés à des objets sur lesquels seuls leur savoir, leur imagination et les instruments adéquats dont ils pourront disposer et qui leur permettront de faire la différence lorsque c'est possible. Les fins des transactions internes peuvent être diverses et variées selon ce qui est visé comme résultat, mais certains résultats peuvent se révéler parfois surprenants, autrement dit inattendus.

En définitive, ce que permettent les nanotechnosciences, c'est de faire fonctionner des choses qui ne sont pas nécessairement *théoriquement* ou *socialement orientées* (je souligne) (cf. les différentes preuves de la manipulabilité atomique sans aucune conséquence sociale ou industrielle précise – déplacement d'atomes de xénon pour former le sigle IBM réalisé par Don Eigler en 1989, la nanoguitare qui inspire à Nordmann (2005), au moins en partie semble-t-il, le concept de « technologie nouménale »). Mais revenons-en au problème que pose Jean-Marc Lévy-Leblond, qui ne voit pas d'un bon œil ce qu'il considère comme la captation de la science par des technologies déterminées directement par une rationalité commerciale, puisque selon lui, c'est le développement de la science en tant qu'activité explicative qui nous permet de savoir « comment ça marche ». Un des exemples qui lui permet d'illustrer son propos est le suivant :

(...) il y a un peu plus d'une dizaine d'années, des expérimentateurs ont montré qu'on sait et qu'on peut fabriquer des corps supra-conducteurs, des choses très compliquées, des pyramides bizarroïdes, qui sont supra-conducteurs à des températures toujours très basses, mais industriellement accessibles : celles de l'azote liquide, c'est-à-dire -100°C ou quelque chose comme cela. Eh bien, fabriquer industriellement un litre d'azote liquide, c'est très facile et ça coûte à peu près le prix d'un litre de bière... Du coup, évidemment, cela devient industriellement très prometteur, sauf que nous ne comprenons toujours pas comment ça marche<sup>89</sup>.

C'est ainsi que le physicien français finit de se convaincre que la technoscience étouffera littéralement la science si cette tendance lente, progressive et peu

<sup>89</sup> Lévy-Leblond. 2000. « La technoscience étouffera-t-elle la science ? », Conférence donnée le 27 janvier 2000 dans le cadre du *café des sciences et de la société*, édité par la Mission Agrobiosciences, avec le soutien de la Société du Sicoval, communauté d'agglomération du sud-est toulousain.

réversible n'est pas renversée. D'après lui, afin de mettre un terme à cette situation, on pourrait tenter de dire : « bon très bien, il n'y a qu'à laisser les nouveaux techniciens ingénieurs développer leur affaire. » Mais, le problème est qu'ils ont quand même besoin de la production de savoirs immédiats et « cette demande, cette exigence est remontée à l'intérieur des institutions de recherche, au point qu'elle constitue à présent l'essentiel du travail des scientifiques, un travail à relativement court terme. » (Lévy-Leblond, 2000).

Pour ce qui est de la possibilité de changer cet état de fait, le ton du philosophe français est plutôt pessimiste : « Je ne dis pas que les choses vont changer du jour au lendemain, nous sommes face à un mouvement de transformation lent, à mon avis profond et je le crains peu réversible, mais est tellement progressif qu'on ne le décèle pas de jour en jour. » (Lévy-Leblond, 2000). En d'autres termes, pour faire écho au titre de sa conférence retranscrite : la technologie étouffera la science, au moins en partie. Nonobstant cette forte tendance technocratique, la science doit-elle se laisser abandonner à ce sort funeste auquel elle semble vraisemblablement condamnée si l'on en croit Lévy-Leblond ? Telle est la question ! Et, c'est là que la philosophie des sciences aurait une carte importante à jouer. D'où la nécessité pour les philosophes des sciences et des technologies d'être présents sur tous les débats autour des nanotechnosciences afin de construire une philosophie digne de la dynamique technoscientifique actuelle. Contrairement au physicien de l'Hexagone, Schmidt (2011) estime que la thèse technoscientifique souligne plutôt la prédominance de la science dans les sociétés de la connaissance ou de la science. Pour lui, citant Roco et Bainbridge :

Une scientification a lieu, en particulier une scientification de la technologie et de la société en général. La nano-technoscience en est un bon exemple. La nano-technoscience est, d'une part basée sur la pointe du progrès des sciences naturelles. D'autre part, son but est « d'améliorer la performance humaine. [... la Nano-technoscience en tant que noyau] des technologies convergentes pourrait réaliser des améliorations considérables dans les capacités humaines, des avantages pour la société, de la productivité pour la nation, et une meilleure qualité de la vie – un tournant dans l'évolution des sociétés humaines » (Roco et Bainbridge 2002). (Schmidt, 2011, p. 109, notre traduction).

Au fond, la philosophie des sciences, plutôt que de ne s'occuper que de « cadavres » tel un médecin légiste (ce qui n'est pas sans rappeler l'oiseau de Minerve de Hegel), devrait aussi s'intéresser aux corps de la science en évolution en se donnant les moyens d'une véritable philosophie de la technoscience ou de la nanotechnoscience. Peut-être que l'approfondissement de cette piste de réflexion, auquel nous nous consacrerons volontiers si l'opportunité nous en est offerte après l'ébauche de ce que nous avons qualifié ici de « transactionnisme », permettra-t-il d'aller vers une pensée plus élaborée susceptible de porter les nanotechnosciences, voire l'ensemble de la technoscience afin de mieux aborder les questions politiques, épistémologiques et éthiques subséquentes dont le transhumanisme et le posthumanisme ne sont pas des moindres ?



## BIBLIOGRAPHIE

- Accelrys Inc. (2004). *Nanotechnology Application Guide*, San Diego, CA : Accelrys Inc.
- Alberganti, Michel (2007). *Sous l'œil des puces, la RFID et la démocratie*, Paris : Actes Sud
- Ambroise, Bruno (2005) Thèse de doctorat, *Les pouvoirs du langage : La contribution de J.L. Austin à une théorie contextualiste des actes de parole*, sous la direction de Francis Wolff (ENS)
- Aristote (1970). *Métaphysique*, Tome 1, A, 3, Paris : Vrin [1<sup>ère</sup> édition en français avec la traduction de J. Tricot, Vrin, 1953]
- Asimov, Isaac (1986). *L'univers de la science*, Paris : InterÉditions
- Austin, J. L. (1990). *Philosophical Papers*, Oxford : ed. by J. O. Urmson and Geoffrey J. Warnock
- . (1979a). « Performative Utterances » [1956], in *Philosophical Papers*, Oxford: Oxford University Press, p. 234-252, traduction de B. Ambroise.
- . (1979b). « Other Minds », in, *Philosophical Papers*, Oxford, Oxford University Press, p. 76-116
- . (1970). *Quand dire, c'est faire*, Paris : Seuil, (Traduction française) [Version originale (1962), *How to do things with Words?*, Oxford University Press]
- . (1962). *Sense and Sensibilia*, Oxford : ed. by Geoffrey J. Warnock
- Ba, Mouhamadou El Hady (2012). *L'interface Langage/Pensée*, Thèse de doctorat, Paris, École Normale Supérieure (ENS)
- Bachelard, Gaston (1977). *La formation de l'esprit scientifique*, Paris : Vrin

- . (1951). *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris : Presses Universitaires de France (PUF)
- . (1953). *Le Matérialisme rationnel*, Paris : Presses Universitaires de France (PUF)
- . (1963). *Le nouvel esprit scientifique*, Paris : Vrin
- Baird, Davis, Alfred Nordmann et Joachim Schummer (2004b). *Discovering the Nanoscale*. Amsterdam: IOS Scientific Publishers. Disponible en ligne sur : <http://cms.ifs.tu-darmstadt.de/fileadmin/phil/nano/nano.html>
- Baird, Davis (2010). « Engineering Realities », *Spontaneous Generations: A Journal for the History and Philosophy of Science*, Vol. 4, No. 1, p. 94-110
- . (2002). « Detached Thing Knowledge, » *Technological Knowledge: Philosophical Reflections*, Boxmeer, The Netherlands, Conférence, 14 June
- . (2002a). « Thing Knowledge: Function and Truth » *Techné: Journal of the Society for Philosophy and Technology*, <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v6n2/baird.html>. 6(2), p. 13-27
- . (2002b). « Detached Thing Knowledge », in Jutta Schickore and Friedrich Steinle, eds., *Revisiting Discovery and Justification*, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Preprint 211, p. 163-173
- . (2003). « Thing Knowledge: Outline of a Materialist Theory of Knowledge », In *Philosophy of Scientific experimentation*, ed. H. Radder, 39-68. Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press. Texte accessible sur le lien suivant:  
[http://lemida.biu.ac.il/pluginfile.php/183261/mod\\_resource/content/2/Baird%202003.pdf](http://lemida.biu.ac.il/pluginfile.php/183261/mod_resource/content/2/Baird%202003.pdf)
- Baird, Davis, Alfred Nordmann et Joachim Schummer (2004b). *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam: IOS Press, 2004
- Ballu, Yves (2006). *De Mélusine à Minatec*, Grenoble : Le Dauphiné libéré
- Barberousse, Anouk, Kistler, Max et Ludwig, Pascal (2000). *La philosophie des sciences au XX<sup>ème</sup> siècle*, Paris : Flammarion
- Bazerman, Charles, *Shaping Written Knowledge: The Genre and Activity of the*

*Experimental Article in Science* (2000). Madison WAC Clearinghouse Landmark Publications in Writing Studies, (première publication en 1988) [Ouvrage téléchargeable sur: [http://wac.colostate.edu/books/bazerman\\_shaping/](http://wac.colostate.edu/books/bazerman_shaping/), Originally Published in Print (1988) by University of Wisconsin Press, Madison, Wisconsin]

Bechtel, W. and Richardson, R. C. (2010). *Discovering complexity: Decomposition and localization as strategies in scientific research*, Second Edition, MA: MIT Press/Bradford Books, Cambridge, (Première édition, 1993)

Béland, Jean-Pierre et Patenaude, Johane (sous la direction de) (2009). *Nanotechnologies : Développement, enjeux sociaux et défis éthiques*, Québec : Les Presses de l'Université Laval

Bensaude-Vincent, Bernadette (2009). *Les Vertiges de la technoscience*, Paris : Éd. Découverte

———. (2004). « Two Cultures of Nanotechnology? », *HYLE, International Journal for Philosophy of Chemistry*, n° 10, p. 65-82

Bensaude-Vincent, B. et al. (2011). « Matters of interest: the objects of research in science and technoscience », *Journal for General Philosophy of Science*, N° 42, p. 365-83

Benveniste Émile (1966). *Problèmes de linguistique générale*, T.1, Paris : Gallimard

Berube, David M. (2006). *Nano-hype: The Truth Behind the Nanotechnology Buzz*, New York : Prometheus Books

Besnier, Jean-Michel (2009). *Demain les posthumains : Le futur a-t-il encore besoin de nous ?*, Paris : Hachette Littératures

Bird, Peter (2006). « Sources of Funding - Societal Dynamics of Nanotechnology », Clarkson University <http://web2.clarkson.edu/projects/nanobird/3.2.php>, Consulté le 22 septembre 2007

Bitbol, Michel (2000). *Physique et philosophie de l'esprit*, Coll. « Nouvelle bibliothèque scientifique », Flammarion

———. (1996). *Mécanique quantique : Une introduction philosophique*, Coll. « Champs », no 391, Paris : Flammarion

- Blumberg, H. (1983). *The Legitimacy of the Modern World*. Cambridge, MA: MIT Press
- Bohr, Niels (1991). *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris : Gallimard, [(*Atomic Physics and Human Knowledge*), Gauthier-Villard, 1961 (pour la traduction)]
- Borvon, Gérard (2009). *Histoire de l'électricité : De l'ambre à l'électron*, Paris : Vuibert
- Bot, Ludovic (2007). *Philosophie des sciences de la matière*, Paris : L'Harmattan
- Bouchard, M. (1994). « La conception du rapport entre technique et science chez Heidegger », communication présentée au 62<sup>e</sup> congrès de l'A.C.F.A.S., Montréal : UQAM
- Bourdieu Pierre (1982). *Ce que parler veut dire, l'économie des échanges linguistiques*, Paris : Fayard
- . (2004). *Choses dites*, Paris : éd. de Minuit, 1987, Bréhier, Émile, *Histoire de la philosophie*, éd. Quadrige/PUF [1<sup>ère</sup> édition 1930-31-38-64]
- Canguilhem Georges (2002). *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris : Vrin, septième édition [1<sup>ère</sup> éd. 1968]
- . (1971). *La connaissance du vivant*, Paris : Vrin
- Cartwright, Nancy (1983). *How the laws of physics lie*, Oxford: Oxford University Press
- Chalmers, Alan (2008). *Qu'est-ce que la science ? : Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend*, Paris : Le Livre de Poche, coll. « Biblio essais » [1987, Paris : Éditions La découverte pour la traduction française.]
- . (1991). *La fabrication de la science*, Paris : Éditions La Découverte
- . (1976). *What is This Thing Called Science?* Cambridge : Hackett
- Churchland, Paul (mars 1990). « Les machines peuvent-elles penser ? », in *Pour la Science*
- Cocardièrre (de la), Philippe (sous la dir. De) (2004). *Histoire des sciences de*



*l'antiquité à nos jours*, Tallandier

Colin, Ronan (1999). *Histoire mondiale des sciences*, Paris : Seuil

Comité d'éthique (Comets) (2006). – *Enjeux éthiques des nanosciences et nanotechnologies*, Paris : CNRS  
[http://www.cnrs.fr/fr/presentation/ethique/comets/docs/ethique\\_nanos\\_061013.pdf](http://www.cnrs.fr/fr/presentation/ethique/comets/docs/ethique_nanos_061013.pdf)

Comité de la prévention et de la précaution (2006). *Nanotechnologies, nanoparticules : quels dangers, quels risques ?* Paris : Ministère de l'écologie et du développement durable  
[http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Nanotechnologies\\_juin\\_2006.pdf](http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Nanotechnologies_juin_2006.pdf),  
 Consulté le 22 septembre 2007

Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (2006). *Les méthodologies qui existent pour évaluer les risques liés aux nanoparticules sont-elles appropriées ?*, Commission européenne  
<http://copublications.greenfacts.org/fr/nanotechnologies/index.htm>,  
 Consulté le 21 septembre 2007

Commission de l'Éthique de la Science et de la Technologie (2006). *Éthique et nanotechnologies : se donner les moyens d'agir*, Québec : Bibliothèque nationale du Québec

Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen et au Comité Économique et Social (2005). *Nanosciences et nanotechnologies : un plan d'action pour l'Europe 2005-2009*, Luxembourg : Office des publications officielles des Communautés européennes  
[http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/action\\_plan\\_brochure\\_fr.pdf](http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/action_plan_brochure_fr.pdf)

Cooren, François (1997). « Actes de langage et argumentation », In *Revue Philosophique de Louvain*, Quatrième série, Tome 95, N° 3, pp. 517-544  
[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/phlou\\_0035-3841\\_1997\\_num\\_95\\_3\\_7048](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/phlou_0035-3841_1997_num_95_3_7048)

Corriu, Robert ; Nozières, Philippe ; Weisbuch, Claude (2004). *Nanosciences – Nanotechnologies*, Paris : Académie des sciences & Académie des technologies, Rapport Partie II

Couzier, Nicolas (2002). *Introduction à l'histoire et à la philosophie des sciences*, Paris : Ellipses Marketing

- Cressler, John D. (2009). *Silicon Earth: Introduction to the Microelectronics and Nanotechnology Revolution*, Cambridge : Cambridge University Press
- Crichton, Michael (2003). *La proie*, Éditions Robert Laffont, Coll. Pocket, [1<sup>ère</sup> édition (2002) Michael Crichton]
- Daston, Lorraine et Peter Galison, *Objectivité* (2012) Les Presses du Réel, avec une préface de Bruno Latour [1<sup>ère</sup> édition Daston et Galison (2007) sous le titre *Objectivity*, Urzone Inc.]
- Datta, S. (1997). *Electronic Transport in Mesoscopic Systems*, Cambridge: Cambridge University Press
- Davy, G. (sous la direction de) (1944). *Logique et philosophie des sciences par Paul Mouy*, Paris : Hachette
- Delemarle, Aurélie (2007). *Les leviers de l'action de l'entrepreneur institutionnel : le cas des micro et nanotechnologies et du pôle de Grenoble*, Thèse de doctorat, Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées
- Diagne, Mamoussé (2005). *Critique de la raison orale : les pratiques discursives en Afrique noire*, Paris : Éditions Khartala
- Diagne, Souleymane Bachir (2008). *Comment philosopher en islam ?*, Paris : Éditions du Panama
- Dickson, M. (2006). « Non-relativistic quantum mechanics », In *Handbook for Philosophy of Physics*. eds. J. Butterfield, and J. Earman, 275-416. Dordrecht: Kluwer
- Dissakè, Emmanuel Malolo (2004). *Karl Popper ; langage, falsificationnisme et science objective*, Paris : PUF, Coll. Philosophies
- . (2001). *FEYERABEND: Épistémologie, Anarchisme et société libre*, Paris : PUF, Coll. Philosophies
- Drexler, Eric-K (2005). *Engins de création : L'avènement des nanotechnologies*, Paris : Vuibert [paru en anglais pour la première fois en 1986 sous le titre : *Engines of Création – The coming Era of Nanotechnology*, puis republié en 1990]
- Dreyfus, Hubert L. (1984). *Intelligence artificielle mythes et limites*, Paris :

Flammarion

Duhem, Pierre (1906). *La Théorie physique, son objet et sa structure*, Paris : Chevalier et Rivière

Dupuy, Jean-Pierre (2009). *La marque du sacré*, Paris : Carnets Nord

———. (avril 2004). « Ethics Beyond prudence. Towards a Normative Assessment of Nanotechnology », of European Workshop on Social and Economic issues of *Nanotechnologies and Nanosciences*, European Commission, Brussels, p. 14-15

Dupuy, Jean-Pierre ; Roure, Françoise (2004). *Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle* (Tome 1) Paris : Conseil Général des Mines, Conseil Général des Technologies de l'Information  
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/054000313/index.shtml>

Eigler, Donald M.; Schweizer, Erhard K. (1990). « Positioning Single Atoms with a Scanning Tunneling Microscope », *Nature*, n° 344, p. 524-526

Einstein, Albert (1983). *L'évolution des idées en physique*, Paris : Champs/Flammarion

Elzinga, A. (2004). « The new production of particularism in models relating to research policy: A critique of Mode 2 and Triple Helix », *Göteborg: Inst for History of Ideas and Theory of Science*, University of Göteborg, Sweden (manuscript)

Espinas Alfred (1897). *Les Origines de la technologie, études sociologiques*, Paris : Alcan

Esquivel, Sada (2008). *Le « nanomonde » et le renversement de la distinction entre nature et technique : entre l'artificialisation de la nature et la naturalisation de l'artifice*, Mémoire de maîtrise, Montréal, UdeM

ETC Group. (2004). *Nanotech: unpredictable and un-regulated*,  
<http://www.etcgroup.org/upload/publication/96/01/nrlivingcolour.pdf>

Etzkowitz, H. (2003). « Innovation in innovation: The triple helix of university-industry-government relations », *Social Science Information*, n° 42, p. 293-337

Fay, Stéphane (2010). « Le nanomonde en questions », in *Science et Vie*, Hors série, N° 162, p. 53-56

Feyerabend, Paul (1989). *Adieu la raison*, Paris : Seuil

———. (1979). *Contre la méthode*, Paris : Seuil

Fleck, Ludwig (2008). *Genèse et développement d'un fait scientifique*, Paris : Éditions Flammarion, Coll. Champs sciences

Floch (Le), Jean-Pierre ; Pollet, Jean ; Veyssset, Jean-Claude et Doniol, Robert (1964). *Pour connaître les techniques : de la roue à la fusée*, Paris : Librairie Larousse

Forman, P. (2007). « The primacy of science in modernity, of technology in postmodernity, and of ideology in the history of technology », *History and Technology*, n° 23, p.1-152

Frege Gottlob (1971a). *Écrits logiques et philosophiques*, trad. fr. par Claude Imbert, Paris : Seuil

———. (1971b). « Recherches logiques, I – La pensée », trad. fr. par Claude Imbert dans *Écrits logiques et philosophiques*, Paris : Seuil, p. 170-213 de *Logische Untersuchungen, I – Der Gedanke, Beiträge zur Philosophie des deutschen Idealismus*, 1, n°3-4, 1918-1919

Funtowicz, S., and Ravetz. (1990). *Uncertainty and Quality in Science for Policy*, Dordrecht : Kluwer

Galison, P. (2006). *The Pyramid and the Ring*, Berlin: Presentation at the conference of the Gesellschaft für Analytische Philosophie (GAP)

Genest, Jonathan et Beauvais, Jacques (2009). « Nanosciences et nanotechnologies », p. 7-36. In *Nanotechnologies : Développement, enjeux sociaux et défis éthiques*, Jean-Pierre Béland et Johane Patenaude (dir. publ.), Québec : Les Presses de l'Université Laval

Gibbons, M. et al. (1994). *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Sciences*. London : Sage

Giere, Ronald, N. (2011). « Lakatos, Popper, and Feyerabend: Some Personal Reminiscences », *Talk at University College London* on 28 February



- . (2006). *Scientific perspectivism*, Chicago : University of Chicago Press
- . (2000). *Cognitive Approaches to Science*, in Newton-Smith, W. H. (2000) *A Companion to the Philosophy of Science*, Blackwell Companions to Philosophy
- . (1999). *Science without Laws*, Chicago : University of Chicago Press
- . (1992). *Cognitive Models of Science*, Minnesota : Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Vol. XV
- . (1979). *Understanding Scientific Reasoning*, New York : Holt, Rinehart and Winston
- Giere, Ronald N & Richard S Westfall (1973). *Foundations of scientific method: the nineteenth century*, Bloomington : Indiana University Press
- Glennan, Stuart, S. (1992). *Mechanisms, Models, and Causation*, Ph.D. Dissertation, Chicago : University of Chicago
- Gooding, David (1993). *The uses of experiment: studies in the natural sciences*, Cambridge [u.a.] : Cambridge Univ. Press.
- Gorman, Michael E. ; Tweney, Ryan D. ; Gooding, David C. ; Kincannon, Alexandra P. (2005). *Scientific and Technological Thinking*, Taylor and Francis group
- Gouët. Philippe (2000). « Passer les frontières », in *Éthiopiques* (Dakar), n° 64-65, 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> semestre
- Greene, Brian (2005). *La magie du cosmos*, Brian Greene, Paris : Robert Laffont
- Habermas Jürgen (1993). « Actions, actes de parole, interactions médiatisées par le langage et monde vécu », dans *La Pensée postmétaphysique, essais philosophiques*, Paris : A. Colin
- Hacking, Ian (2005). « Les philosophes de l'expérience » (*Philosophers of Experiment*) », *Tracés. Revue de Sciences humaines* [En ligne], n° 9 mis en ligne le 11 février 2008, consulté le 3 janvier 2013. URL : <http://traces.revues.org/201> ; DOI : 10.4000/traces.201

- . (2002). *Historical Ontology*, Cambridge, MA : Havard University Press
- . (1989). *Concevoir et expérimenter*, Paris : Christian Bourgois Éditeur, trad. B. Ducrest
- . (1988). « Philosophers of Experiment » article publié par *Philosophy of Science Association* (1989)
- . (1983). *Representing and Intervening*, Cambridge : Cambridge University Press
- . (1981). *Scientific Revolutions*, Oxford : Oxford University Press
- Hanson, N. R. (1965). *Patterns of Discovery*, Cambridge : Cambridge University, [1<sup>st</sup> ed. 1958]
- Haraway, D. (1997). *Modest\_Witness@Second\_Millenium*. New York, NY : Routledge
- Harré, H. Rom (2011). « Equipment for an Experiment », *Spontaneous Generations: A Journal for the History and Philosophy of Science*, Vol. 4, n° 1, p. 30-38
- . (2003). « The materiality of instruments in a metaphysics for experiments », In *Philosophy of Scientific experimentation*, ed. H. Radder, 19-38. Pittsburgh, PA : University of Pittsburgh Press
- . (1998). « Recovering the Experiment », *Philosophy*, Volume 73, Issue 03, pp 353 – 377, Cambridge University Press
- . (1975). *Problems of scientific revolution: progress and obstacles to progress in the sciences*, Oxford : Clarendon Presse
- Heidegger, Martin (1958). *Essais et conférences*, Paris : Gallimard
- Hempel, Carl (1966). *Éléments d'épistémologie (Philosophy of Natural Science)*, trad. B. Saint-Sernin, Paris : Armand Colin
- . (1965). *Aspects of scientific explanation and other essays in the philosophy of science*, New York : Free press

- Hempel, Carl, G. et Oppenheim, P. (1948). *Studies in the Logic of Explanantion*, Philosophy of Science 15: 135-175
- Hervé-Bazin, Benoit (sous la dir. De) (2007). *Les nanoparticules un enjeu majeur pour la santé au travail ?*, Les Ulis : EDP Sciences
- HM Government (2005). *Response to the Royal Society and Royal academy of engineering report: Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, London : Department of Trade and Industry [www.dti.gov.uk/] <http://www.dti.gov.uk/files/file14873.pdf>
- Hohlfeld R. (1988). « Biologie als Ingenieurskunst. Zur Dialektik von Naturbeherrschung und synthetischer Biologie », *Ästhetik und Kommunikation* n° 69, p. 61–67
- Holton, Gerald (1981). *L'imagination scientifique*, Paris : Éditions Gallimard, [Titre original : *The Scientific Imagination* (1978)]
- Hottois, Gilbert (2005a). *La science entre valeurs modernes et postmodernité*, Paris : Vrin
- . (2005b). « Technoscience », in C. Mitcham (éd.), *Encyclopedia of Science, Technology and Ethics*, 4 vol., Macmillan Reference
- . (2004a). *Philosophies des sciences, philosophies des techniques*, sous l'égide du Collège de France, Paris : Odile Jacob
- . (2004b). « De la philosophie des sciences à la philosophie des techniques », in *Bulletin de la Classe des lettres et des sciences morales et politiques de l'Académie Royale de Belgique*, 1-6
- . (2004c). « Quelles philosophies du progrès pour le troisième millénaire ? », in *Biologie moderne et visions de l'humanité*, Bruxelles, Communauté européenne et De Boeck
- . (2002a). « La neutralité de la technique », dans *Sciences et Avenir*, n° 130
- . (2002b). *Species Technica*, Paris : Vrin,
- . (2002c). *Technoscience et Sagesse ?*, Nantes : Ed. Pleins Feux

- . (2001a). « La foi dans le langage », dans. Mattéi J.-F. (éd.), *Philosopher en français*, Paris : PUF
- . (2001b). « Y a-t-il une philosophie de la technique ? », dans Ferenczi T. (éd), *Penser la technique*, Bruxelles, Complexe,
- . (2000a). « La technoscience : entre technophobie et technophilie », dans Michaud Y. (éd), *Qu'est-ce que la vie ?*, Paris : O. Jacob
- . (2000b). « Travail et technoscience », dans Delacampagne C. et Maggiori R. (éds), *Philosopher*, Paris : Fayard
- . (1997). *La philosophie des technosciences*, Abidjan : Presses des Universités de Côte d'Ivoire
- . (1996). *Entre symboles et technosciences. Un itinéraire philosophique*, Seyssel : Champ Vallon. Paris : PUF
- . (1993). *G. Simondon et la philosophie de la culture technique*, Bruxelles : De Boeck
- . (1990). *Le paradigme bioéthique (Une éthique pour la technoscience)*, Bruxelles-Montréal : De Boeck-Erpi
- . (1989). *Du sens commun à la société de communication. Études de philosophie du langage*, Paris : Vrin
- . (1984a). *Le signe et la technique (La philosophie à l'épreuve de la technique)* (préface de J. Ellul), Paris : Aubier
- . (1984b). *Pour une éthique dans un univers technicien*, Bruxelles : Éd. de l'Université de Bruxelles
- . (1981). *Pour une métaphilosophie du langage*, Paris : Vrin
- . (1979). *L'inflation du langage dans la philosophie contemporaine* (préface de J. Ladrière), Bruxelles : Éditions de l'Université de Bruxelles
- . (1976). *La philosophie du langage de L. Wittgenstein* (préface de J. Bouveresse), Bruxelles : Éditions de l'Université de Bruxelles
- Hume, David (1983). *Enquête sur l'entendement humain, (An Enquiry Concerning*



*Human Understanding*, 1748) trad. A. Leroy et M. Beyssade, Paris : Garnier Flammarion

Humphreys, Paul, W. (1989). *Scientific Explanation: The Causes, Some of the Causes, and Nothing But the Causes*, in P. Kitcher et W. C. Salmon (ed.), Minnesota : Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Vol. XIII

Ihde, Don (1991). *Instrumental Realism: The Interface Between Philosophy of Science and Philosophy of Technology*, Bloomington : Indiana University Press

Ihde, Don, and E. Selinger (eds.). (2003). *Chasing Technoscience*. Bloomington : Indiana University Press,

Jacob, Pierre (1996). *De Vienne à Cambridge*, Paris : Gallimard

Jacques Francis (1979). *Dialogiques, Recherches logiques sur le dialogue*, Paris : PUF

Jakobson, Roman (1963). *Essais de linguistique générale*, trad. par N. Ruwet, Paris : Éd. Minuit

Joachim, Christian (2006). « The driving power of the quantum superposition principle for molecule machines », *Journal of Physics: Condensed Matter*, 18, 1935-1942

———. (2005). « To Be Nano or Not to Be Nano? », *Nature Materials*, 4, 107-109

Joachim, Christian et Plévert, Laurence (2008). *Nanosciences : La révolution invisible*, Paris : Seuil

Joachim, Christian, Gimzewski, J.K. & Aviram, A. (2000). « Electronics using hybridmolecular and mono-molecular devices », *Nature*, 408, 541-548

Joachim, Christian, Guchet, X. & Loeve, S. (25 avril 2007). « Controverses sur l'histoire des nanotechnologies », séminaire *Enjeux anthropologiques, culturels et philosophiques des nanosciences et nanotechnologies*, Paris : Institut de Recherche et d'Innovation, Centre Georges Pompidou [http://www.iri.centrepompidou.fr/seminaire/fonds-documentaires/?browse=Nanotechnologies%252F23\\_05\\_2007](http://www.iri.centrepompidou.fr/seminaire/fonds-documentaires/?browse=Nanotechnologies%252F23_05_2007)

- Joerges, Bernward et Shinn, Terry (dir.) (2001). *Instrumentation Between Science, State and Industry*, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers
- Johnson, Ann, in Baird & Nordmann & J. Schummer (2004). « The End of Pure Science: Science Policy from Bayh-Dole to the NNI », *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam : IOS Press
- Kadvany, John (2001). *Imre Lakatos and the Guises of Reason*, Durham and London : Duke University Press, A series edited by Barbara Herrnstein Smith and E. Roy Weintraub
- Kapp, Ernst (2007). *Principes d'une philosophie de la technique*, Paris : Vrin,
- Kastenhofer, Karen (June 2010). « Do we need a specific kind of technoscience assessment? Taking the convergence of science and technology seriously » *Poiesis & Praxis*, Volume 7, Issue 1-2, p. 37-54
- Kastenhofer, Karen et Schmidt, Jan C. (2011a). « Technoscience est Potentia? Contemplative, interventionist, constructionist and creationist idea(l)s in (techno)science », *Poiesis Praxis*, N° 8, p. 125-149
- . (2011b). « On Intervention, Construction and Creation: Power and Knowledge in Technoscience and Late-Modern Technology », *Quantum Engagements*, T.B. Zülsdorf et al. (Eds.)
- Kellogg, (Autumn 2006). « Toward a Post-Academic Science Policy: Scientific Communication And The Collapse Of The Mertonian Norms » *International Journal of Communications Law & Policy*, Special Issue, Access to Knowledge
- Kerorguen (de), Yan (2006). *Les nanotechnologies, espoir, menace ou mirage ?*, Paris : Lignes de repères
- Kistler, Max (2009). « Explication mécaniste et causalité descendante », in Thierry Martin (éd.), *L'unité des sciences. Nouvelles perspectives*, Paris : Vuibert, p. 69-89
- . (2007a). « La réduction, l'émergence, l'unité de la science et les niveaux de réalité », *Matière Première* 2, p. 67-97
- . (2007b). « The Causal Efficacy of Macroscopic Dispositional Properties », in Max Kistler et Bruno Gnassounou (éds.), *Dispositions and Causal Powers*, Aldershot, Ashgate, p. 103-132

- . (2006a). « La causalité comme transfert et dépendance nomique », *Philosophie* n° 89, p. 53-77
- . (2006b). « Les causes des actions », *Le temps philosophique, Numéro spécial : L'action*, vol. 12, p. 141-175
- . (2006c). « Lois, exceptions et dispositions », in Bruno Gnassounou et Max Kistler (éd.), *Les dispositions en philosophie et en sciences*, Paris, CNRS Éditions, p. 175-194
- . (2006d). « New perspectives on reduction and emergence in physics, biology and psychology » (préface), *Synthese* 151 (2006), p. 311-312 Kistler, Max, « Unité des sciences, causalité et rôle causal de l'esprit », in Sophie Hamon et Mathieu Amy (coord.), *La cause : approche pluridisciplinaire*, *Linx* 54, p. 125-137
- . (2005). « La rationalité et la causalité dans le réalisme interne de Putnam », *Philosophie*, n° 85, p. 62-92
- . (2004a). « La causalité dans la philosophie contemporaine », *Intellica*, 2004-1, 38, p. 139-185
- . (2004b). « Le combinatorialisme et le réalisme nomologique sont-ils compatibles ? », in: J.-M. Monnoyer (ed.), *La structure du monde : objets, propriétés, états de choses*, Paris : Vrin, p. 199-221
- . (1999). *Causalité et lois de la nature*, Paris : Vrin, Collection Mathesis
- Kotarbinski, Tadeusz (2007). *Traité du travail efficace*, trad. Coord. par Jean-Luc Dumont, Besançon : Presses Universitaires de Franche-Comté
- Koyré, Alexandre (1985). *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris : Gallimard
- . (1973). *Du monde clos à l'univers infini*, Paris : Gallimard
- Kuhn, Thomas S. (1990). *La tension essentielle*, Paris : Gallimard, [1<sup>ère</sup> éd. By the University of Chicago, 1977]
- . (1983). *La structure des révolutions scientifiques*, Paris : Flammarion, [1<sup>ère</sup> éd. By the University of Chicago, 1962]

- . (1969). *The Structure of Scientific Revolutions*, 2<sup>e</sup> éd. augmentée du texte de 1962, Chicago : University of Chicago Press
- Kurzweil, Ray et Mesmin, Adeline (2007). *Humanité 2.0 : la bible du changement*, Paris : M21 Éditions
- Lafontaine, Céline (2010). *Nanotechnologies et société - Enjeux et perspectives : entretiens avec des chercheurs*, Québec : Les Éditions du Boréal
- . (2008). *La société postmortelle : La mort, l'individu et le lien social à l'ère des technosciences*, Paris : Seuil
- Lahmani, Marcel (sous la direction de) (2006). *Les nanosciences - 1. Nanotechnologies et nanophysique*, Paris : Belin
- Lakatos, Imre (1994). *Histoire et méthodologie des sciences - Programme de recherche et reconstruction rationnelle*, Paris : PUF, [1<sup>ère</sup> éd. *Philosophical Papers*, vol. 1, Cambridge University Press, 1978. N.B. : Ce livre est la traduction des chapitres 1, 2 et 4.]
- . (1984). *Preuves et réfutations : essai sur la logique de la découverte mathématique* Paris : Hermann
- . (1978a). *Philosophical Papers*, vol. 1 : *The Methodology of Scientific Research Programmes*, Cambridge : Cambridge University Press
- . (1978b). *Philosophical Papers*, vol. 2 : *Mathematics, Science and Epistemology*, Cambridge : Cambridge University Press
- Lakatos, Imre & Musgrave, A. (1970). *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge : Cambridge University Press
- Laredo, Philippe et Mustar P. (2003). « Politique publique de recherche et d'innovation », dans P. Mustar et H. Penan, (éds), *Encyclopédie de l'innovation*, Paris : Economica, p. 613-626.
- Latouche, Serge (2004). *La Mégamachine : Raison technoscientifique, raison économique et mythe du progrès*, Paris : Éditions La Découverte
- Latour, Bruno (2007). *L'espoir de Pandore : Pour une version réaliste de l'activité scientifique* Paris : Éditions La Découverte



- . (2005a). *La science en action : Introduction à la sociologie des sciences*, Paris : Éditions La Découverte - Nouvelle éd.
- . (2005b). *La vie de laboratoire : La production des faits scientifiques*, Paris : Éditions La Découverte
- . (2005c). *Nous n'avons jamais été modernes : Essai d'anthropologie symétrique*, Paris : Éditions La Découverte
- . (1987). *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society*, Cambridge, MA : Harvard University Press
- Laudan, Larry (1987). *La dynamique de la science*, Bruxelles : Pierre Mardaga éditeur
- . (1977). *Progress and its Problems*, Berkeley : University of California Press
- Laugier, S. et Wagner, P. (2004a). *Théories expériences et méthodes*, Paris : Vrin
- . (2004b). *Naturalismes et réalismes*, Paris : Vrin,
- Laurent, Louis (2007). *Les nanotechnologies vont-elles changer notre vie ? 82 questions à Louis Laurent, physicien*, Spécifique Éditions
- Laurent, Louis et Petit, J.-C. (2005). *Les nanotechnologies doivent-elles nous faire peur ?*, Paris : Le pommier
- Laurent, Louis & Petit, Jean-Claude (2004). « *Nanosciences : nouvelle âge d'or ou apocalypse* », Paris : CEA  
[http://www.cea.fr/recherche\\_fondamentale/nanosciences\\_et\\_nanotechnologies/nanosciences\\_nouvel\\_age\\_d\\_or\\_ou\\_apocalypse](http://www.cea.fr/recherche_fondamentale/nanosciences_et_nanotechnologies/nanosciences_nouvel_age_d_or_ou_apocalypse), Consulté le 21 septembre 2007
- Le Deaut, Jean-Yves (janvier 2005). *La place des biotechnologies en France et en Europe*, Paris : Rapport, Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST)
- Lecourt, Dominique (2006). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Paris : PUF - 4e édition revue et augmentée
- . (2001). *Philosophie des sciences*, Paris : Presses Universitaires de

France, Coll. Que sais-je ?

———. (1971). *Bachelard épistémologie*, Paris : PUF

Lenk, Hans & Maring, Matthias (2001). *Advances and problems in the philosophy of technology*, Münster : LIT

Leprince-Ringuet, Louis (1973). *Science et bonheur des hommes*, Paris : Flammarion,

Lévy-Leblond, Jean-Marc (2000). « La technoscience étouffera-t-elle la science ? », Conférence donnée le 27 janvier 2000 dans le cadre du *café des sciences et de la société*, Édité par la Mission Agrobiosciences, avec le soutien du Sicoval, communauté d'agglomération du sud-est toulousain.

Loeve, Sacha (2009). *Le concept de technologie à l'échelle des molécules-machines : Philosophie des techniques à l'usage des citoyens du nanomonde*, Thèse de doctorat, Paris, Université Paris-Ouest

Lorenz, Konrad et Popper, Karl (1995). *L'avenir est ouvert*, Paris : Flammarion,

Lorrain, Jean-Louis et Raoul, Daniel (mai 2004). « Nanosciences et progrès médical », Paris : Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST) <http://www.senat.fr/rap/r03-293/r03-293.html>

Luzeaux, Dominique et Puig, Thierry (2007). *À la conquête du nanomonde : Nanotechnologies et microsystèmes*, Éditions du félin,

Lytard, Jean-François (1993). « New Technologies », in Lyotard J-F. (ed) *Political Writings*, Minneapolis, MN : University of Minnesota Press, p. 14-18

———. (1982/1993). *Political Writings*, Minnesota : University of Minnesota Press Minneapolis

———. (1979). *La Condition postmoderne : rapport sur le savoir*, Paris : Minuit

Maestrutti, Marina (2011). *Imaginaires des nanotechnologies : mythes et fictions de l'infiniment*, Paris : Vuibert

———. (2008). « Le corps glorieux. L'imaginaire du corps dans les nanotechnologies entre mythe et utopie », in B. Bensaude-Vincent, R.

Larrère, V. Nurock (dir.), *Bionano-éthique. Perspectives critiques sur les bionanotechnologies*, Paris : Vuibert

Mansoori, G. Ali (2005). *Principles of nanotechnology: molecular-based study of condensed matter in small systems*, Hackensack, N.J. : World Scientific

Maricle, Brian (2008). *Thomas Kuhn: In the Light of Reason*, Mission Viejo, CA : Brian Maricle

Matsuura, Jeffrey H. (2006). *Nanotechnology Regulation And Policy Worldwide*, Artech House

Maynard, Andrew et Michelson, Evan (2005). *The Nanotechnology Consumer Products Inventory*, dans Wilson Center and The Pew Charitable Trusts <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www2.cst.gov.uk/cst/business/files/ww6.pdf>, Consulté le 18 janvier 2011

McCray, W. Patrick (juin 2005). « Will Small be Beautiful? Making Policies for our Nanotech Future », In *History and Technology*, vol. 21, N° 2, p. 177-203

Merz, Fabienne Martina (sept. 2006). « La fabrique des sciences : des institutions aux pratiques », Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), Lausanne, pp. 147-163

Michael Gleiche, Holger Hoffschulz, Steve Lenhart (2006). « Nanotechnology in Consumer Products », Nanoforum.org, European Nanotechnology Gateway [http://www.nanoforum.org/nf06~modul~showmore~folder~99999~scid~421~.html?action=longview\\_publication&](http://www.nanoforum.org/nf06~modul~showmore~folder~99999~scid~421~.html?action=longview_publication&), Consulté le 18 octobre 2009

Mitcham, Carl (2000). *Research in Philosophy and Technology: Metaphysics, Epistemology, and Technology*. vol. 19, Greenwich (Connecticut) : JAI Press

Mitcham, Carl and Stephen H. Cutcliffe (ed) (2001). *Visions of STS: Contextualizing Science, Technology, and Society Studies*. New York : SUNY Press

———. (1994). *Thinking through Technology: The Path between Engineering and Philosophy*, Chicago : The University of Chicago Press

Mody, Cyrus (2006). « Corporations, Universities, and Instrumental Communities: Commercializing Probe Microscopy, 1981-1996 », *Technology and Culture*, 47 (1), p. 56-80

- . (2004a). « Small, but Determined: Technological Determinism in Nanoscience », *HYLE--International Journal for Philosophy of Chemistry*, 10 (2), p. 99-128 <http://www.hyle.org/journal/issues/10-2/mody.htm>, Consulté le 15 mars 2010
- . (2004b). « How Probe Microscopists Became Nanotechnologists » in D. Baird, A. Nordmann & J. Schummer (eds.), *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam: IOS Press, 119-133 [Recommandé par Cyrus Mody]
- Moore, Gordon Earle (1965). « Cramming more components onto integrated circuits », *Electronics*, Volume 38, Number 8, April 19, Accessible en ligne par ce lien : [http://www.pdfdownload.org/pdf2html/view\\_online.php?url=http%3A%2F%2Fdownload.intel.com%2Fmuseum%2FMoores\\_Law%2FArticles-Press\\_releases%2FGordon\\_Moore\\_1965\\_Article.pdf](http://www.pdfdownload.org/pdf2html/view_online.php?url=http%3A%2F%2Fdownload.intel.com%2Fmuseum%2FMoores_Law%2FArticles-Press_releases%2FGordon_Moore_1965_Article.pdf)
- Moret, Roger (2006). *Nanomonde : des nanosciences aux nanotechnologies*, Paris : CNRS éditions
- Motterlini, Matteo (2002) « Reconstructing Lakatos: a reassessment of Lakatos' epistemological project in the light of the Lakatos Archive », *Study in History and Philosophy of Science*, volume 33, Issue 3, p. 487–509 [Elsevier Science : [www.elsevier.com/locate/shpsa](http://www.elsevier.com/locate/shpsa)]
- . (ed) (1999). *For and against Method. Including Lakatos' Lectures on Method and the Lakatos–Feyerabend Correspondence*, Chicago : University of Chicago Press
- Nabok, Alexei (2005). *Organic and Inorganic Nanostructures*, Norwood MA : Artech House, Inc.
- Nadeau, Robert (sous la dir. de) (2009). *Philosophies de la connaissance*, Québec et Paris : Presses de l'Université Laval et Librairie Philosophique J.Vrin, coll. Mercure du Nord
- Nagel, Ernst (1961). *The Structure of Science*, Harcourt, Brace and World, New York
- Nano2e – « Éthique et Épistémologie des nanotechnologies » [http://nano2e.org/?page\\_id=39](http://nano2e.org/?page_id=39) [Il faut plutôt se rendre sur le site <http://www.nano2e.com/> (<http://www.nano2e.com/wp-content/uploads/downloads/2010/07/LE-PROGRAMME-NANO2E.pdf>), le site nano2e.org n'étant plus accessible.]



National Nanotechnology Initiative. « About the NNI »  
[http://www.nano.gov/html/about/home\\_about.html](http://www.nano.gov/html/about/home_about.html), Consulté le 24  
 septembre 2007

———. « National Nanotechnology Initiative: FY 2008 Budget &  
 Highlights » [http://www.nano.gov/NNI\\_FY08\\_budget\\_summary-  
 highlights.pdf](http://www.nano.gov/NNI_FY08_budget_summary-highlights.pdf), National Science and Technology Council. Consulté le 24  
 septembre 2007

National Research Council of the National Academies (2006). *A Matter of Size :  
 Triennial Review of the National Nanotechnology Initiative*, Washington DC :  
 The National Academy Press

National Science and Technology Council (1999). *Nanotechnology: shaping the  
 World Atom by Atom*, Washington, D.C.

Newton-Smith, W. H. (1981). *The Rationality of Science*, London : Routledge and  
 Kegan Paul

Nordmann, Alfred (2012). « Object lessons: towards an epistemology of  
 technoscience », *Scientiæ Studia*, São Paulo, v. 10, special issue, p. 11-31

———. (2008). « No future for nanotechnology? Historical development vs.  
 global expansion », *Emerging Conceptual, Ethical and Policy Issues in  
 Bionanotechnology*. Springer Netherlands, p. 43-63

———. (2006). « Collapse of distance: Epistemic strategies of science and  
 technoscience », *Danish Yearbook of Philosophy*, 41, p. 7-34

———. (2004). « Molecular disjunctions : Staking claims at the nanoscale »,  
 In *Discovering the Nanoscale*, eds. D. Baird, A. Nordmann, and J. Schummer,  
 p. 51-62. Amsterdam: IOS Press

Nowotny, H., P. Scott, and M. Gibbons (2001). *Rethinking Science: Knowledge and  
 the Public in an Age of Uncertainty*. Cambridge, MA : Polity

Observatoire français des techniques avancées (2001). *Nanocomposants et  
 nanomachines*, Paris : O.F.T.A.

Observatoire des Micro et NanoTechnologies (OMNT) (2010), *Synthèse de  
 l'Année 2009*, Grenoble : OMNT, Unité Mixte de Service CEA-CNRS n°  
 2920

- O'Mathuna, Donald P. (2009). *Nanoethics: Big Ethical Issues with Small Technology*, Continuum
- Pautrat, Jean-Louis (2002). *Demain le nanomonde : Voyage au cœur du minuscule*, Paris : Fayard
- Penrose, Roger (1999). *Les deux infinis et l'esprit humain*, Paris : Flammarion
- PMO (Pièces et Main d'œuvre) (2003). *Nanotechnologies/Maxiservitudes : des contributions grenobloises à l'automatisation du cheptel humain*, Grenoble : PMO  
<http://pmo.erreur404.org/Maxiservitude.rtf>
- Poole, Charles P. Jr. Et Owens Frank J. (2003). *Introduction to Nanotechnology*, Wiley-Interscience
- Popper, Karl R. (1998). *Des sources de la connaissance et de l'ignorance*, Paris : Payot & Rivages
- . (1992). *Un univers de propensions ; deux études sur la causalité et l'évolution*, Éditions de L'éclat
- . (1990). *Le réalisme et la science*, Paris : Hermann, éditeurs des sciences et des arts
- . (1984). *L'univers irrésolu*, Paris : Hermann, [éd. Anglaise, 1982]
- . (1976). *Unended Quest: an Intellectual Autobiography*, LaSalle : Open Court
- . (1973). *La logique de la découverte scientifique*, Paris : Payot
- . (1965). *The Logic of Scientific Discovery*, New York : Harper and Row, traduction anglaise du livre de 1934
- Pradeep, T. (2008). *Nano, The Essentials: Understanding Nanoscience and Nanotechnology*, New Dehli : McGraw-Hill Professional, [1<sup>ère</sup> édition 2007]
- Proceedings of the National Academy of Sciences (2002). *Nanoscience: Underlying Concepts and Phenomena*, Sackler NAS Colloquium, Washington, DC : The National Academies Press

- Puech, Michel (2008). *Homo sapiens technologicus*, Paris : Éditions Le Pommier
- Pupil, François (1993). *La miniature*, Nancy : Presses Universitaires de Nancy
- Rabinow, P. (1997). *Essays in the Anthropology of Reason*. Princeton, NJ : Princeton University
- Radder, Hans et al. (2003). *The Philosophy of Scientific Experimentation*, Pittsburgh : University of Pittsburgh Press
- Ratner, Mark & Daniel (2003). *Nanotechnologies : la révolution de demain*, Paris : Campus Press, Traduction française par Nathalie Audard et Erick Seinandre (*Nanotechnology : A Gentle introduction to the Next Big Idea*, pour la version anglaise, Pearson Education, Inc., 2003)
- Reboul, O. (1990). *La rhétorique*, Paris : PUF
- Reichenbach, Hans (1957). *Experience and Prediction: an Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge*, [1938 pour la première version]
- Riedel, D.; Mayne, A.; Dujardin, G.; Bellec, A.; Chiarravalotti, F.; Cranney, M. & Lapastis, M. (2008). 'Probing the movements of a single molecule', *Plein Sud, Special Recherche*, 2008-2009, 74-79  
[http://www.pleinsud.u-psud.fr/specialR2008/en/08\\_Probing\\_the\\_movements\\_of\\_a\\_single\\_molecule.pdf](http://www.pleinsud.u-psud.fr/specialR2008/en/08_Probing_the_movements_of_a_single_molecule.pdf)
- Rishi Raj et Dinesh Chandra Agrawal (2009). *Introduction to Nanoscience*, Burlington MA : Academic Press Inc,
- Robert, Serge (2009). « Logique de la découverte et naturalisation de la connaissance : L'épistémologie historique d'Imre Lakatos », in Nadeau, Robert (sous la dir. de), *Philosophies de la connaissance*, Québec et Paris, Presses de l'Université Laval et Librairie Philosophique J. Vrin, coll. Mercure du Nord
- Robert, Serge (2007). *Nanotechnology: Societal Implications II, Individual Perspectives*, New York : Springer
- . (2001). *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Dordrecht/Boston/London : Kluwer Academic Publishers
- . (1992). « Abduction, correction et apprentissage », Séminaire sur *La Représentation*, Montréal : CIRADE (UQAM) n° 69

- . (1993). *Les mécanismes de la découverte scientifique : une épistémologie interactionniste*, Ottawa : Presses de l'Université d'Ottawa,
- . (1978). *Les révolutions du savoir : théorie générale des ruptures épistémologiques*, Longueuil : Le Préambule
- Robitaille, Michèle (2008). *Culture du corps et technosciences : vers une « mise à niveau » technique de l'humain ? Analyse des représentations du corps soutenues par le mouvement transhumaniste*. Thèse de doctorat, Montréal, UdeM
- Roco, Mihail C. and Bainbridge, William Sims (2007). *Nanotechnology: Societal Implications II, Individual Perspectives*, Dordrecht : Springer
- . (2003). *Converging Technologies for Improving Human Performance*, Dordrecht/Boston/London : Kluwer Academic Publishers
- . (2001). *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Dordrecht/Boston/London : Kluwer Academic Publishers
- Roger Moret (Centre de Vulgarisation de la Connaissance) (2006). *Nanomonde : Des nanosciences aux nanotechnologies*, Paris : éd. CNRS
- Rohrer, H., « The nanoworld: chances and challenges », in *Proc. Of Intl. Conf. On Nanophase Chemistry Houston USA*, 23-24 Oct. 1995
- Rorty, Richard (1994). *Objectivisme, relativisme et vérité*, Paris : P.U.F
- Roussin, Daniel (2008). *La logique quantique comme fondement de la métaphysique de la mécanique quantique*. Thèse de doctorat, Montréal, UQAM
- Roy, Bruno et Zumthor, Paul (1985). *Jeux de mémoire : aspects de la mnémotechnie médiévale*. Montréal : Gaetan Morin Editeur Ltee
- Royal society, Royal Academy of Engineering (2004). *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*. London, UK : Royal society <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>
- Salmon, W. C. (1984). *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*, Princeton : Princeton University Press



- Sarewitz, Daniel (2003). 'Does Science Policy Exist, and If So, Does it Matter? Some Observations on the U.S. R&D Budget' Discussion Paper for Earth Institute Science, Technology, and Global Development Seminar, April 8, 2003
- Sargent, Ted (2006). *Bienvenue dans le nanomonde*, Paris : Dunod
- Schmidt, Jan C. (2011). « Toward an epistemology of nano-technosciences: Probing technoscience from a historical perspective: on today's surprising prevalence and relevance of Francis Bacon », *Poiesis Prax*, n°8, p. 103–124
- . (2004). « Unbounded Technologies: Working Through Technological Reductionism of Nanotechnology », in D. Baird, A. Nordmann & J. Schummer, *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam: IOS Press
- Schummer, J. (2006). « Gestalt Switch in Molecular Image Perception: The Aesthetic Origin of Molecular Nanotechnology in Supramolecular Chemistry », *Foundations of Chemistry*, 8, p. 53-72
- . (2004a). « Multidisciplinarity, Interdisciplinarity and patterns of research collaboration in nanoscience and nanotechnology », *Scientometrics*, 59 (3), p 425-465
- . (2004b). « Interdisciplinary Issues in Nanoscale Research », in D. Baird, A. Nordmann & J. Schummer, *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam: IOS Press
- Schummer, Joachim et Baird, Davis (editors) (2006). *Nanotechnology Challenges: Implications for philosophy and society*, World Scientific Publishing
- Schweber S., and Wächters M. (2000). « Complex systems, modelling and simulation », *Studies in History and the Philosophy of Modern Physics*, 31(4):583-609
- Searle, John R. (1990a). « Is the brain's mind a computer program », *Scientific American*, 262 (1), p. 26-31
- . (1990b). « L'esprit est-il un programme d'ordinateur ? », *Pour la science*, (149), p. 38-44
- . Searle, John R. (1985). *L'intentionnalité. Essai de philosophie des états mentaux*, Paris : Minuit

- . (1984). *Minds, Brains and Science*, Cambridge, Mass. : Harvard University Press
- . (1982a). *Sens et expression, étude de théorie des actes de langage*, Paris : Éditions de Minuit
- . (1982b). *Sens et expression*, trad. fr. par Joëlle Proust, Paris : Ed. de Minuit, de *Expression and Meaning* (1975), Cambridge : Cambridge University Press
- . (1970). *Les Actes de langage, essai de philosophie du langage*, Paris : Hermann, trad. fr. par H. Pauchard de *Speech Acts*, Cambridge U.P. (1969)
- . (1968). « Austin on Locutionary and Illocutionary Acts », *The Philosophical Review*, 77, n° 4, p. 405-424
- Searle John R. & Vanderveken Daniel (1985). *Foundations of Illocutionary Logic*, New York : Cambridge U.P.
- Séralini, Gilles-Éric (2010). *Ces OGM qui changent le monde*, Paris : Flammarion [1<sup>ère</sup> éd. 2004]
- Séralini, Gilles-Éric & Pelt, Jean-Marie (2006). *Après nous le déluge ?*, Paris : Flammarion/Fayard
- . (2003). *Génétiquement incorrect*, Paris : Flammarion
- Sfez, Lucien (1992). *Critique de la Communication*, Paris : Le Seuil, 3<sup>e</sup> édition [1<sup>ère</sup> édition, 1988]
- Simondon, Gilbert. (1994). « Prospectus pour Du mode d'existence des objets techniques », in Bibliothèque du Collège international de philosophie, *Gilbert Simondon, Une pensée de l'individuation et de la technique*, Paris : Albin Michel [1958], p. 265-267
- . (1989a). *L'individuation psychique et collective*, Paris: Aubier, [1954]
- . (1989b). *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris : Aubier, [1958]

- Smalley, R.E. (2001). « Of chemistry, love, and nanobots », *Scientific American*, 285, p. 76-77
- Strawson, P.L. (1952). *Introduction to Logical Theory*, London : Methuen
- Suppe, F., dir. (1977). *The Structure of Scientific Theories*, 2<sup>e</sup> éd., Urbana, IL. : University of Illinois Press
- Sussan, Rémi (2005). *Les utopies posthumaines : Contre-culture, cyberculture, culture du chaos*, Montreuil : Omniscience
- Taniguchi, N. (1974). *On the Basic Concept of 'Nano-Technology'*, Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering
- . (1999). « La structure logique des dialogues intelligents », dans *Analyse et Simulation de conversations, de la théorie des actes de discours aux systèmes intelligents*, B. Moulin, S. Delisle & B. Chaib-draa édés., Lyon, l'Interdisciplinaire, p. 61-100
- Taylor, Gordon Rattray (1969). *La révolution biologique*, Paris : Robert Laffont
- UNESCO (2006). *The ethics and politics of nanotechnology*, Paris : UNESCO  
<http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001459/145951e.pdf>
- van Fraassen, Baas (1980). *The Scientific Image*, Oxford : Clarendon Press
- . (2008). *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*, Oxford : Oxford University Press
- Vanderveken, Daniel (1990, 1991). *Meaning and Speech Acts*, Vol. 1 : *Principles of Language Use*, Vol. 2 : *Formal Semantics of Success and Satisfaction*, Cambridge : Cambridge University Press
- . (1988). *Les Actes de discours*, Bruxelles : Mardaga
- Vernant, Denis (2011a). *Introduction à la philosophie contemporaine du langage : Du langage à l'action*, Paris : A. Colin
- . (2011b). « Relire Austin », *La Philosophie du langage ordinaire, Histoire et actualité de la philosophie oxonienne*, B. Ambroise & S. Laugier édés. Hildesheim, Georg Olms Verlag

- . (2010a). « De la bipolarité des concepts, des théories, des axiomatiques », *Construction, Festschrift für Gerhard Heinzman*, P.E. Bour, M. Rebuschi & L. Rollet eds. London, College Publications, "Tributes" series, p. 667-681
- . (2010b). « Nanotechnologies, enjeux épistémologiques et sociétaux », *Nanotechnologies : sciences, marché, réglementation et société. Quelles avancées ?*, Conseil Supérieur de la Recherche et de la Technologie, Paris, La Documentation Française, p. 45-49
- . (2010c). « Pragmatique de la véridicité », *Prépublications de la Maison des Sciences de l'Homme*, n°1, Lorraine
- . (2010d). « La "logique" du langage naturel », *La logique naturelle aujourd'hui, enjeux & perspectives*, D. Miéville éd., Travaux du Centre de recherche sémiologiques, n° 68, Neuchâtel, p. 195-214
- . (2009). *Discours et vérité : analyses pragmatique, dialogique et praxéologique de la véridicité*, Paris : J. Vrin
- . (1999). « Les niveaux d'analyse des phénomènes communicationnels : sémantique, pragmatique et praxéologique », *Analyse et simulation des conversations. De la théorie des actes de discours aux systèmes multi-agents*, B. Moulin & B. Chaib-draa eds. Lyon, L'Interdisciplinaire, p.101-131
- . (1998). « Du dire au faire, les niveaux d'analyse des phénomènes communicationnels », *Revue d'interaction homme-machine (RIHM)*, Paris, Europia Production, vol 1, n°1, p. 11-32
- . (1997). *Du discours à l'action, études pragmatiques*, Paris : Presses Universitaires de France
- Vinck, Dominique (2009). *Les nanotechnologies*, Paris : Le Cavalier Bleu
- . (2005). « Ethnographie d'un laboratoire de recherche technologique : analyse de la médiation entre recherche publique et appropriation privée », *Sciences de la Société*, n° 66, p. 73-91
- . (2000). *Pratiques de l'interdisciplinarité*, Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble
- . (1999). *Ingénieurs au quotidien. Ethnographie de l'activité de*



*conception et d'innovation*, Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble

Vinck, Dominique et al. (Sept. 2006). « Culture de la différence et pratiques de l'articulation entre chercheurs en micro et nanotechnologies », Leresche, Jean-Philippe, Benninghoff, Martin, Crettaz von Roten, Fabienne, Merz, Martina, *La fabrique des sciences. Des institutions aux pratiques*, Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), Lausanne

Walter B. Weimer (1979). *Notes on the Methodology of Scientific Research*, Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates,

Wautelet, Michel et al. (2006). *Les Nanotechnologies*, 2<sup>e</sup> éd. Dunod, Paris : éd. Fayard, (2003 pour la 1<sup>ère</sup> édition)

Wimsatt WC (2007). *Re-engineering philosophy for limited beings: piecewise approximations to reality*, Cambridge : Harvard U. P.

Woodward, James (2010a). "Causation in Biology: Stability, Specificity, and the Choice of Levels of Explanation", *Biology and Philosophy* 25: 287-318

———. (2010b). "Just do it? Just do it? Investigating the Gap between Prediction and Action in Toddlers' Causal Inferences" (Co-authored with Bonawitz et al.) *Cognition* 115: 104-117

———. (2010c). "The Structure and Dynamics of Scientific Theories: A Hierarchical Bayesian Perspective" (Co-authored with Henderson et al.) *Philosophy of Science* 77: 172-200

———. (2008). "Mental Causation and Neural Mechanisms", In Hohwy and Kallestrup, eds. *Being Reduced: New Essays on Reduction, Explanation, and Causation*: 218-262.

———. (2007a). "Interventionist Theories of Causation in Psychological Perspective". In Gopnik and Schulz (eds.) *Causal Learning: Psychology, Philosophy and Computation*, p. 19-36.

———. (2007b). "Moral Intuition: Its Neural Substrates and Normative Significance" (Co-authored with John Allman). *Journal of Physiology - Paris* 101: 179-202.

———. (2006). "Sensitive and Insensitive Causation". *The Philosophical Review* 115: 1-50.

———. (2003). *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*,  
Oxford : Oxford University Press

Ziman, J. (2000). *Real Science*. Cambridge : Cambridge University Press